



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

Larissa de Almeida Ramos

Relatório de Estágio Supervisionado

Laboratório de Radiometria - UFCG

Campina Grande, PB
Maio de 2021

Larissa de Almeida Ramos

Relatório de Estágio Supervisionado

Laboratório de Radiometria - UFCG

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres

Supervisor: Prof. Dr. Edmar Candeia Gurjão

Campina Grande, PB

Maio 2021

Larissa de Almeida Ramos

Relatório de Estágio Supervisionado

Laboratório de Radiometria - UFCG

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____ / ____ / ____

Alexandre Jean René Serres, DSc

Professor Orientador

Edmar Candeia Gurjão, DSc

Professor Avaliador

Campina Grande, PB

Maio 2021

*Dedico este trabalho aos meus amados pais,
Maria Dulce de Almeida e Ubirajara de Souto Ramos*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado em todo o caminho da graduação, por todo amparo em momentos difíceis, por todos os ensinamentos e bênçãos concedidas, por me fazer entender que a vida é muito mais do que atinge minha compreensão.

À Nossa Senhora, por interceder pela minha vida e meus sonhos, por levar minhas orações para mais perto do céu.

Aos meus pais, Dulce e Ubirajara, por todo apoio ao longo deste caminho, por todas as orações, por todos os esforços realizados para que eu tivesse uma boa educação, por todo amor e amparo em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis. Eu não seria quem sou hoje sem vocês. Aos demais membros da minha família, que acreditaram e torceram por mim.

A minha amiga Morgana, que mesmo depois de tantos anos, e seguindo um caminho completamente distinto ao meu, se fez presente ao longo da minha vida, torcendo pelos meus sonhos. Aos demais amigos que fiz durante o período escolar, sou grata pelos momentos vividos, ensinamentos compartilhados e torcida constante.

Às pessoas extraordinárias que curso me proporcionou conhecer, Taís, Isabel, Larissa, Guerra, Sílvia, Alison, Weverton, Marília, Joyce, Rebeca, Erika, Jorginho e Hérciles, cujos momentos compartilhados, ajuda, suporte emocional e amizade foram muito importantes durante a caminhada. Agradeço por terem contribuído para que eu chegasse até aqui. Guardarei boas lembranças de cada história vivida.

Ao professor orientador, Alexandre, agradeço toda a paciência, orientação e ensinamentos, além de toda ajuda nas etapas de construção do presente trabalho.

Deixo meus agradecimentos também à Isabel, que com disposição, paciência e generosidade, me ajudou e esclareceu as inúmeras dúvidas que tive durante esta etapa final, como também ao longo dos anos.

Por fim, deixo aqui meus agradecimentos aos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da caminhada e contribuíram para minha formação.

”Isto é uma ordem: sê firme e corajoso. Não te atemorizes, não tenhas medo, porque o Senhor está contigo em qualquer parte para onde fores.”

Josué 1:9

Resumo

Neste trabalho estão descritas as atividades desenvolvidas pela estagiária Larissa de Almeida Ramos no Laboratório de Radiometria, na Universidade Federal de Campina Grande, sob orientação do professor Dr. Alexandre Jean René Serres e supervisão do professor Dr. Edmar Candeia Gurjão. O estágio supervisionado foi realizado durante o período de 22 de fevereiro à 05 de abril de 2021, com uma carga horária de 30 horas semanais, totalizando 180 horas. A estudante foi responsável por desenvolver um sistema de antenas adaptativas (AAS) que realiza a varredura de feixes, empregando em sua execução a técnica de comutação de feixes, a partir da utilização de uma Matriz de Butler 4x4, com objetivo de aumentar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio 5G à 3,5 GHz.

Palavras-chave: Estágio Supervisionado, Sistema de Antenas Adaptativas, Matriz de Butler, varredura de feixes, 5G.

Abstract

This work describes the activities developed by intern Larissa de Almeida Ramos at the Radiometry Laboratory, at the Federal University of Campina Grande, under the guidance of Professor Alexandre Jean René Serres (DSc) and supervised by Professor Edmar Candeia Gurjão (DSc). The supervised internship was carried out from February 22 to April 5, 2021, with a workload of 30 hours per week, totaling 180 hours. The student was responsible for developing an adaptive antenna system (AAS) that performs beamforming using the beam switching technique in its execution, using a Butler Matrix 4x4, in order to increase the performance of communication systems 5G wireless at 3.5 GHz.

Keywords: Supervised Internship, Adaptive Antenna System, Butler Matrix, Beamforming, 5G

Lista de Figuras

Figura 1 - Matriz de Butler 4x4 com arranjo de antenas	4
Figura 2 - Geometria do acoplador híbrido 90°	6
Figura 3 - Geometria do <i>crossover</i>	6
Figura 4 - Geometria do defasador de -45°	7
Figura 5 - Geometria da antena planar retangular	7
Figura 6 - Acoplador híbrido simulado	11
Figura 7 - Parâmetros S do acoplador híbrido	12
Figura 8 - Diferença de fase, em graus, entre os sinais da porta 2 e 3	12
Figura 9 - <i>Crossover</i> simulado	13
Figura 10 - Parâmetros S do <i>crossover</i> quando a porta 1 é alimentada	13
Figura 11 - Parâmetros S do <i>crossover</i> quando a porta 2 é alimentada	13
Figura 12 - Defasamento, em graus, entre os sinais das portas 1 e 3 e 2 e 4	14
Figura 13 - Defasador de -45° simulado	15
Figura 14 - Parâmetros S do defasador de -45°	15
Figura 15 - Diferença de fase, em graus, entre os sinais da porta 1 e 2 do defasador de -45°	15
Figura 16 - Antena simulada	16
Figura 17 - S11 da antena	16
Figura 18 - Diagrama de irradiação 2D da antena	17
Figura 19 - Linha 1 simulada	18
Figura 20 - S12 da Linha 1	18
Figura 21 - Diferença de fase, em graus, entre os sinais da porta 1 e 2 da Linha 1	18
Figura 22 - Linha 2 simulada	19
Figura 23 - S21 da Linha 2	19
Figura 24 - Diferença de fase, em graus, entre os sinais da porta 1 e 2 da Linha 2	19
Figura 25 - Matriz de Butler simulada	20
Figura 26 - Defasamento entre a entrada 1 e as saídas 5, 6, 7 e 8, da Matriz de Butler, quando a porta 1 é alimentada	21
Figura 27 - Defasamento entre a entrada 2 e as saídas 5, 6, 7 e 8, da Matriz de Butler, quando a porta 2 é alimentada	21
Figura 28 - Defasamento entre a entrada 3 e as saídas 5, 6, 7 e 8, da Matriz de Butler, quando a porta 3 é alimentada	21
Figura 29 - Defasamento entre a entrada 4 e as saídas 5, 6, 7 e 8, da Matriz de Butler, quando a porta 4 é alimentada	22
Figura 30 - Matriz de Butler com arranjo de antenas simulada	23
Figura 31 - Diagramas de Irradiação do sistema quando a porta 1 é alimentada	24
Figura 32 - Diagramas de Irradiação do sistema quando a porta 2 é alimentada	24

Figura 33 - Diagramas de Irradiação do sistema quando a porta 3 é alimentada .	25
Figura 34 - Diagramas de Irradiação do sistema quando a porta 4 é alimentada .	25
Figura 35 - Matriz de Butler com arranjo de antenas construída	26

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Defasamento entre as entradas e as saídas de uma Matriz de Butler 4x4	3
Tabela 2 - Ângulos de varredura	5
Tabela 3 - Comparativo dos valores de defasamento teóricos e simulados entre as entradas e as saídas da Matriz de Butler 4x4 simulada	22
Tabela 4 - Comparativo entre os ângulos de varredura θ teóricos e simulados do sistema	25

Lista de Abreviaturas e Siglas

AAS	Adaptive Antenna System
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
FR4	<i>Flame Resistant</i> (comumente chamado de fibra de vidro)
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.1.1	Objetivo Geral	1
1.1.2	Objetivos Específicos	1
1.2	Estrutura do Trabalho	2
2	Local do Estágio	2
3	Fundamentação Teórica	3
3.1	Varredura de Feixes e a Matriz de Butler	3
3.2	Acoplador Híbrido 90°	5
3.3	<i>Crossover</i>	6
3.4	Defasador de -45°	7
3.5	Antena	7
4	Atividades Desenvolvidas	11
4.1	Acoplador Híbrido 90°	11
4.2	<i>Crossover</i>	12
4.3	Defasador de -45°	14
4.4	Antena	16
4.5	Linhas de transmissão sem defasamento	17
4.6	Matriz de Butler	20
4.7	Matriz de Butler com arranjo de antenas	23
4.7.1	Protótipo da Matriz de Butler com arranjo de antenas	26
5	Conclusão	26
	Referências Bibliográficas	28

1 Introdução

A execução do estágio supervisionado é um requisito obrigatório para alunos concluintes e previsto pelo Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

É esperado que, com a realização do estágio obrigatório, o aluno se familiarize com a área de atuação e possa, de forma prática, consolidar os conhecimentos adquiridos durante a graduação, sendo, portanto, ferramenta de extrema importância à formação profissional.

O estágio supervisionado, cujas atividades realizadas pela estudante Larissa de Almeida Ramos estão descritas no presente relatório, foi ambientado no Laboratório de Radiometria, compreendendo o período de 22 de fevereiro à 05 de abril de 2021, com uma carga horária de 30 horas semanais, totalizando 180 horas (6 créditos), sob a orientação do professor Dr. Alexandre Jean René Serres e a supervisão do professor Dr. Edmar Candeia Gurjão.

No Laboratório de Radiometria, a estagiária desenvolveu um sistema de antenas adaptativas (AAS) que realiza a varredura de feixes (*beamforming*), empregando em sua execução a técnica de comutação de feixes, a partir da utilização de uma Matriz de Butler 4x4, com objetivo de aumentar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio 5G à 3,5 GHz.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é descrever as experiências e contribuições do estágio supervisionado cujas atividades envolveram o desenvolvimento de um sistema de antena inteligente que aplica a técnica de *beamforming* para aumentar o desempenho de sistemas de comunicação sem fio 5G à 3,5 GHz.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisa bibliográfica sobre a técnica de varredura de feixes e a Matriz de Butler.
- Simulação do sistema de antenas inteligentes e análise dos resultados

1.2 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1 foram apresentados, sucintamente, as informações mais relevantes acerca do estágio realizado.

No capítulo 2 é fornecido, de forma breve, um panorama geral do laboratório onde o estágio foi realizado.

O capítulo 3 é destinado à fundamentação teórica acerca dos principais temas empregados na realização das atividades.

No capítulo 4 estão descritas de forma detalhada as atividades desenvolvidas pela estagiária em laboratório.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões acerca do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros que possam complementar as atividades realizadas.

2 Local do Estágio

O Laboratório de Radiometria está localizado no bloco CJ pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande. Têm como integrantes professores doutores e pesquisadores, bem como alunos de graduação e pós-graduação.

O laboratório tem como principal objetivo desenvolver atividades e projetos ligados à área de telecomunicações, cujos trabalhos envolvem as seguintes linhas de pesquisa:

- Coleta de Energia;
- Dispositivos de Rádio-Frequência;
- Metamateriais;
- Modelagem Computacional de Efeitos Eletromagnéticos;
- RFID e Sensoriamento.

No Laboratório de Radiometria, os alunos encontram ambiente favorável para aprimoramento dos conhecimentos teóricos e das habilidades práticas.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Varredura de Feixes e a Matriz de Butler

O crescimento contínuo do tráfego nas comunicações móveis levou recentemente à recomendação da banda de frequência para aplicações sem fio 5G. Devido às altas perdas de propagação, seria difícil utilizar uma antena omnidirecional ou uma antena de feixe fixo (Huang, 2008).

Para superar esses problemas, vários estudos foram realizados recentemente com a tecnologia dos sistemas de antenas adaptativas (AAS) para aumentar o sinal na direção desejada (*beamforming*) enquanto rejeita os sinais de interferência, aumentando assim a capacidade e a qualidade do serviço (Hong *et al.*, 2014).

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. A técnica possui diversas vantagens, tais como: melhoraria do 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 (Nascimento, 2019). Para a execução da varredura de feixes neste trabalho foi aplicada a técnica de comutação de feixes com utilização da Matriz de Butler.

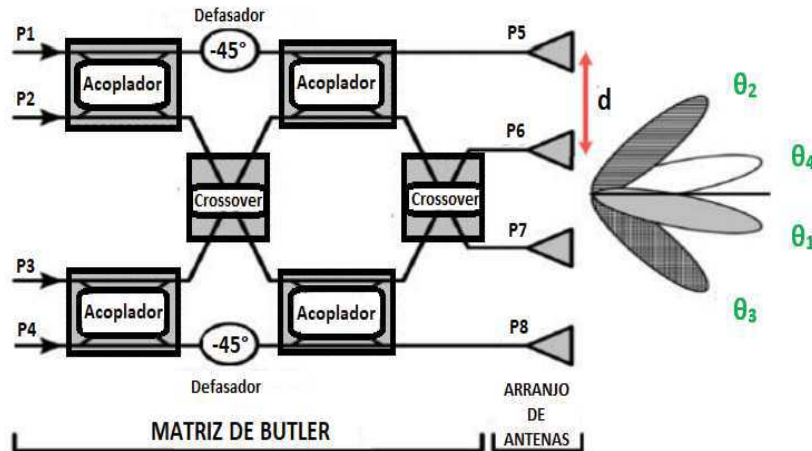
Qualificada pela primeira vez por Jesse Butler e Ralph Lowe, a Matriz de Butler é uma estrutura de N entradas e N saídas em que, a depender da entrada que esta sendo alimentada, a propagação eletromagnética até a saída seguirá uma determinada direção de orientação (Nascimento, 2019). Portanto, para uma Matriz de Butler 4x4 (quatro entradas e quatro saídas), as diferenças de fase entre as portas de saída, para cada entrada alimentada, estão apresentadas na Tabela 1. As portas 1, 2, 3 e 4 são as entradas e as portas 5, 6, 7 e 8 são as saídas. Na Figura 1 é possível observar uma Matriz de Butler 4x4 utilizada para alimentar um arranjo de antenas.

Tabela 1: Defasamento entre as entradas e as saídas de uma Matriz de Butler 4x4

	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 entre as saídas	$\Phi_1 = -45^\circ$	$\Phi_2 = 135^\circ$	$\Phi_3 = -135^\circ$	$\Phi_4 = 45^\circ$

Fonte: (Autora, 2021).

Figura 1: Matriz de Butler 4x4 com arranjo de antenas



Fonte: (Adaptado de Al Habibi, 2014).

Pela análise das informações contidas na figura e em tabela, é possível perceber que, quando a porta 1 é alimentada, as saídas 5, 6, 7 e 8 estão defasadas entre si de um ângulo $\Phi_1 = -45^\circ$. Quando a porta 2 é alimentada, as saídas 5, 6, 7 e 8 estão defasadas entre si de um ângulo $\Phi_2 = 135^\circ$. Já quando a porta 3 é alimentada, as saídas 5, 6, 7 e 8 estão defasadas entre si de um ângulo $\Phi_3 = -135^\circ$. Por fim, quando a porta 4 é alimentada, as saídas 5, 6, 7 e 8 estão defasadas entre si de um ângulo $\Phi_4 = 45^\circ$.

Ao conectar as saídas da Matriz de Butler ao arranjo de antenas, o ângulo de varredura θ_n do sinal transmitido pelas antenas depende da diferença de fase Φ_n observada entre as saídas da matriz, bem como da distância d entre os elementos de antena. Matematicamente, o ângulo de varredura θ_n é determinado pela Equação 1 (Yamada et al, 2018):

$$\text{sen}\theta_n = -\frac{\lambda_0}{d} \frac{\Phi_n}{360} \quad (1)$$

onde

θ_n é o ângulo de varredura quando a porta n é alimentada.

Φ_n é a diferença de fase entre as saídas da Matriz de Butler quando a porta n é alimentada.

Uma vez que as antenas devem estar separadas a uma distância mínima de $\frac{\lambda_0}{2}$ de forma a evitar acoplamento mútuo entre elas, escolhendo $d = \frac{\lambda_0}{2}$ e conhecendo a diferença de fase Φ_n entre as saídas, montou-se a Tabela 2 com os ângulos de varredura θ_n .

Tabela 2: Ângulos de varredura

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
Ângulos de varredura	14,5°	-48,6°	48,6°	-14,5°

Fonte: (Autora, 2021).

Dessa forma, quando a porta 1 estiver alimentada, o sinal emitido pelo arranjo de antenas estará defasado de um ângulo $\theta_1 = 14,5^\circ$ em relação à normal. Caso a porta 2 esteja sendo alimentada, o sinal emitido pelo arranjo de antenas estará defasado de um ângulo $\theta_2 = -48,6^\circ$ em relação a normal. Para a situação em que a porta 3 esteja sendo alimentada, o sinal emitido pelo arranjo de antenas estará defasado de um ângulo $\theta_3 = 48,6^\circ$. Já quando a porta 4 é alimentada, o sinal emitido pelo arranjo de antenas estará defasado de um ângulo $\theta_4 = -14,5^\circ$. Portanto, é possível mudar a direção (variar o ângulo de varredura) do sinal que as antenas emitem, ou seja, realizar o *beamforming*, simplesmente alimentando individualmente cada uma das portas de entrada da Matriz de Butler. Uma Matriz de Butler 4x4 é composta por quatro acopladores híbridos 90° , dois *crossovers*, dois defasadores de -45° .

3.2 Acoplador Híbrido 90°

Sendo também conhecido como acoplador híbrido 3 dB, é a parte mais significativa dentro da Matriz Butler, uma vez que há quatro acopladores na estrutura (Hamza et al, 2014). Seu funcionamento se dá da seguinte forma: a potência do sinal que entra na porta 1 será dividida igualmente, ou seja, reduzida de 3 dB, entre as saídas, as portas 2 e 3, com uma diferença de fase de 90° entre os sinais, enquanto a porta 4 se encontra isolada (Sfar et al., 2014). A Figura 2 ilustra a geometria do acoplador híbrido 90° , onde $Z_{02} = Z_0$, $Z_{01} = \frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ e λ_g é o comprimento de onda efetivo. Matematicamente, o comprimento de onda efetivo é obtido por meio da Equação 2 (Al Habibi, 2014):

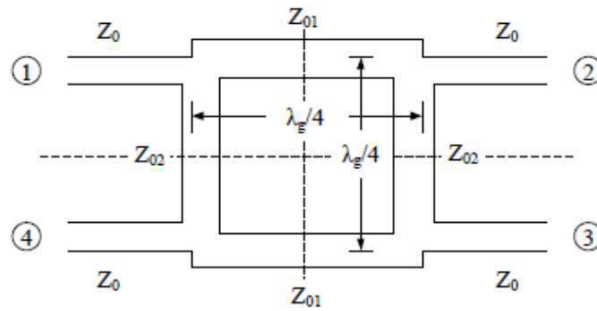
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

onde

λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre.

ϵ_{eff} é a permissividade elétrica efetiva.

Figura 2: Geometria do acoplador híbrido 90°

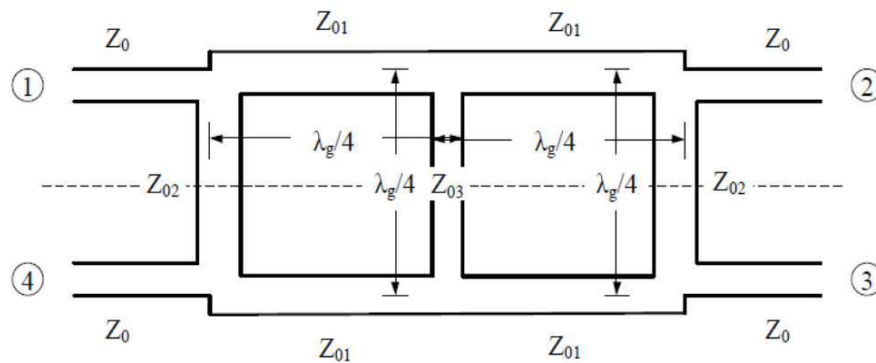


Fonte: (Al Habibi, 2014).

3.3 Crossover

O *crossover* é um circuito que possui duas entradas e duas saídas, sendo construído cascadeando dois acopladores híbridos 90° (Al Habibi, 2014). Também conhecido como acoplador 0 dB, permite que dois sinais eletromagnéticos se cruzem sem que causem interferência eletromagnética entre si (Vieira dos Santos, 2015). Dessa forma, é colocado no ponto da matriz onde as linhas se interceptam para evitar a combinação de sinais (Hamza *et al*, 2014). A Figura 3 apresenta a geometria de um *crossover*, onde $Z_{02} = Z_{03} = Z_0$ e $Z_{01} = \frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ (Al Habibi, 2014).

Figura 3: Geometria do *crossover*



Fonte: (Al Habibi, 2014).

Seu funcionamento é muito simples. Para um sinal introduzido na porta 1, o mesmo irá percorrer o circuito de forma a sair na porta 3, estando as portas 2 e 4 em isolamento. Caso o sinal seja introduzido na porta 2, ele irá percorrer o circuito até sair na porta 4, estando as portas 1 e 3 isoladas (Vieira dos Santos, 2015).

3.4 Defasador de -45°

São requeridos dois defasadores de -45° para compor a Matriz de Butler. Como o próprio nome sugere, seu funcionamento se dá de forma que o sinal que entra em uma porta sai em outra porta deslocado em fase de -45° (Vieira dos Santos, 2015). A Figura 4 apresenta a geometria do referido defasador. O comprimento L da linha é determinado pela Equação 3 (Sfar *et al*, 2014):

$$L = \theta \frac{\lambda_g}{360} \quad (3)$$

onde:

θ é o módulo do ângulo, em graus, do deslocamento de fase.

λ_g é o comprimento de onda efetivo.

Figura 4: Geometria do defasador de -45°

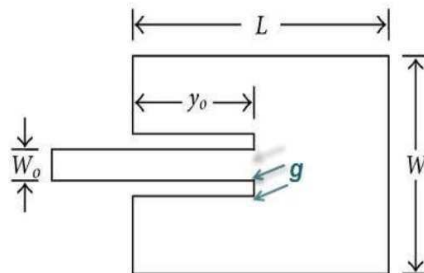


Fonte: (Sfar *et al*, 2014).

3.5 Antena

É preciso projetar uma antena planar retangular, cujo modelo está ilustrado na Figura 5, que atue na frequência central requerida e apresente boas características de ganho de maneira que, uma vez acoplada à Matriz de Butler, irá aumentar o ganho total do sistema, tornando viável a estrutura total.

Figura 5: Geometria da antena planar retangular



Fonte: (Al Habibi, 2014).

A partir do conhecimento da permissividade elétrica relativa (ϵ_r) e altura h do substrato, e frequência de ressonância (f_r), o procedimento para encontrar as dimensões

da antena segue os próximos passos (Al Habibi, 2014):

1. Cálculo da largura do *patch* (W):

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4)$$

onde

c é a velocidade da luz no espaço livre. 3×10^8 m/s

ϵ_r é a permissividade elétrica relativa

f_r é a frequência de ressonância

2. Cálculo da permissividade elétrica efetiva (ϵ_{eff}):

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right) \quad (5)$$

onde

h é a altura do substrato

ϵ_r é a permissividade elétrica relativa

W é a largura do *patch*

3. Cálculo do comprimento do *patch* (L):

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (6)$$

sabendo que

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (7)$$

e

$$\Delta L = 0,412h \frac{(e_{eff} + 0,3)\left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{\left((e_{eff} - 0,258)\left(\frac{W}{h} + 0,8\right)\right)} \quad (8)$$

onde:

L_{eff} é o comprimento efetivo

ΔL é a extensão de comprimento

c é a velocidade da luz no espaço livre. 3×10^8 m/s

ϵ_r é a permissividade elétrica relativa

ϵ_{eff} é a permissividade elétrica efetiva

f_r é a frequência de ressonância

h é a altura do substrato

W é largura do *patch*

4. Cálculo da largura da linha de alimentação do *patch* (W_0):

- Para $W_0/h < 2$

$$\frac{W_0}{h} = \frac{8e^A}{8e^{2A} - 2} \quad (9)$$

- Para $W_0/h > 2$

$$\frac{W_0}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) \right] \quad (10)$$

sabendo que

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad (11)$$

e

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (12)$$

onde

Z_0 é a impedância característica

ϵ_r é a permissividade elétrica relativa

ϵ_{eff} é a permissividade elétrica efetiva

5. Cálculo do comprimento da linha de alimentação do *patch* (L_0):

$$L_0 = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (13)$$

onde

c é a velocidade da luz no espaço livre. 3×10^8 m/s

ϵ_{eff} é a permissividade elétrica efetiva

f_r é a frequência de ressonância

6. Cálculo do comprimento do *gap* (y_0):

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right) \quad (14)$$

onde

$$R_{in}(y = 0) = \frac{1}{2G_1} \quad (15)$$

e

$$G_1 = \frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda_0}\right)^2 \quad (16)$$

e para $W \ll \lambda_0$, temos que

$$R_{in}(y = y_0) = 50 \Omega \quad (17)$$

onde

R_{in} é a parte real da impedância de entrada

G_1 é a condutância

W é a largura do *patch*

L é o comprimento do *patch*

λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre

7. Cálculo da largura do *gap* (g):

$$g \approx \frac{W_0}{N} \quad (18)$$

onde

L_0 é a largura da linha de alimentação do *patch*

N pode ser (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 ...)

4 Atividades Desenvolvidas

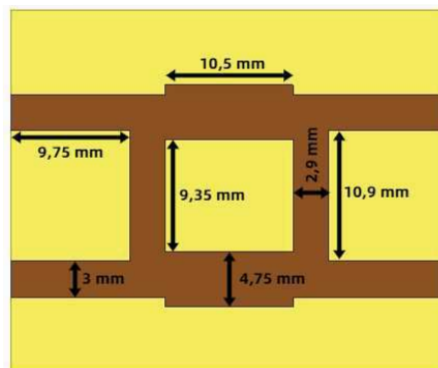
Neste capítulo serão descritas as principais atividades desenvolvidas durante o estágio, implementadas no ambiente HFSS (*High Frequency Structure Simulator*) da ANSYS®. Primeiramente, serão simuladas as estruturas que irão compor a Matriz de Butler, em seguida será simulada a Matriz de Butler, por fim será simulada a estrutura composta pela conexão entre a Matriz de Butler e o arranjo de antenas. Após as simulações, os resultados obtidos serão avaliados.

O substrato utilizado em simulação foi o FR4 que possui espessura de 1,52 mm, permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $\tan \delta = 0,02$. Serão registradas as dimensões otimizadas e resultados obtidos para cada estrutura, bem com os resultados finais da antena inteligente.

4.1 Acoplador Híbrido 90°

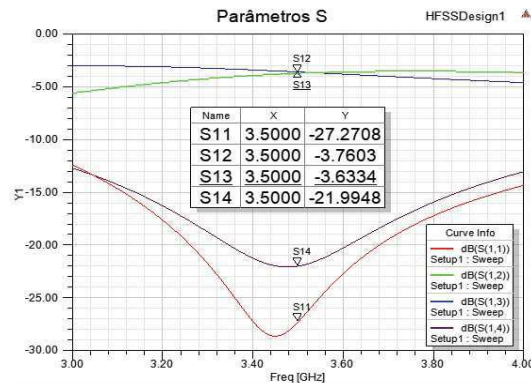
Os principais objetivos ao projetar acoplador são alcançar, na frequência central de 3,5 GHz, uma diferença de fase de 90° entre as portas 2 e 3, e magnitude de $S_{12} = S_{13} = -3\text{dB}$. A circuito projetado, o gráfico com os parâmetros de espalhamento e o gráfico com a diferença de fase, em graus, entre os sinal das portas 2 e 3 estão apresentados nas Figuras 6, 7 e 8, respectivamente.

Figura 6: Acoplador híbrido simulado



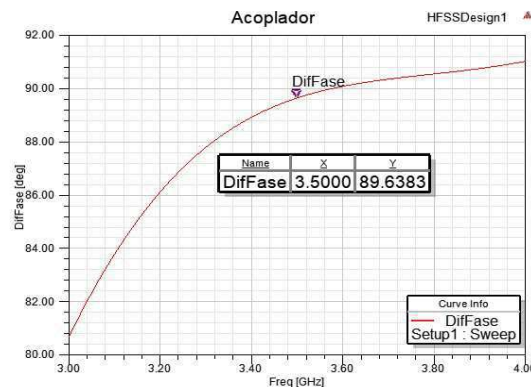
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 7: Parâmetros S do acoplador híbrido



Fonte: (Autora, 2021).

Figura 8: Diferença de fase, em graus, entre os sinais da porta 2 e 3



Fonte: (Autora, 2021).

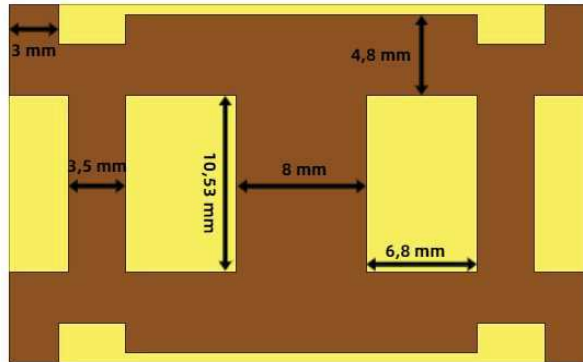
Como é possível observar pela análise dos gráficos, obteve-se $S_{12} = -3,76$ dB e $S_{13} = -3,63$ dB, muito próximos do alvo -3 dB, bem como se verifica que entre a porta 2 e a porta 3 há uma diferença de fase de $89,63^\circ$, próxima aos 90° desejados. Na porta 4 obteve-se $S_{14} = -21,99$ dB (< -20 dB), significando que a porta está de fato em isolamento, bem como $S_{11} = -27,27$ dB (< -20 dB), significando que pouca potência retorna para a porta de alimentação. Todos os resultados referidos à frequência central de 3,5 GHz. Considerando as perdas inerentes ao material, pode-se concluir que os resultados da simulação do acoplador híbrido 90° foram satisfatórios.

4.2 Crossover

Os principais objetivos ao projetar o *crossover* são obter a magnitude de $S_{13} = 0$ dB e defasamento de 0° entre as sinais das portas 1 e 3, todos na frequência central de 3,5 GHz, para o caso da porta 1 estar sendo alimentada no momento. Caso o sinal esteja entrando pela porta 2, é esperado obter magnitude de $S_{24} = 0$ dB e defasamento de 0° entre as sinais das portas 2 e 4, todos na frequência central de 3,5 GHz. O circuito

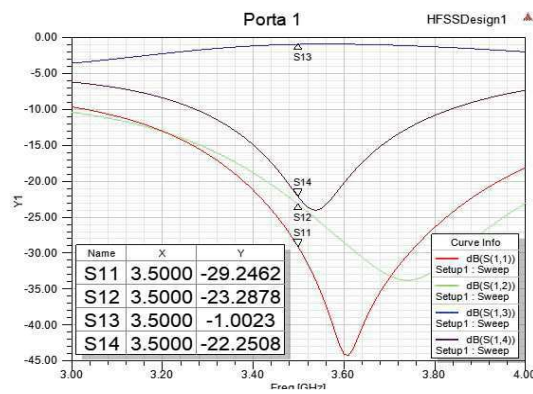
projetado, os gráficos com os parâmetros de espalhamento quando a porta 1 e 2 são alimentadas, o gráfico com a diferença de fase, em graus, entre os sinal das portas 1 e 3 e 2 e 4 estão apresentados nas Figuras 9, 10, 11 e 12, respectivamente.

Figura 9: *Crossover* simulado



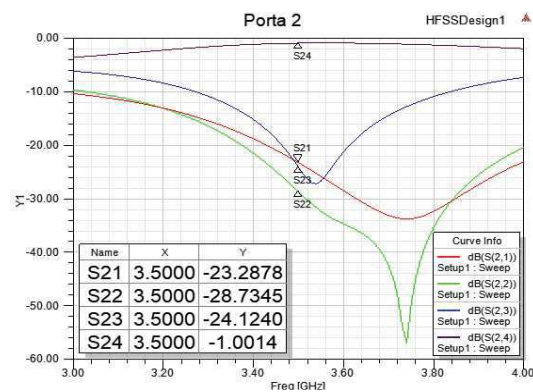
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 10: Parâmetros S do *crossover* quando a porta 1 é alimentada



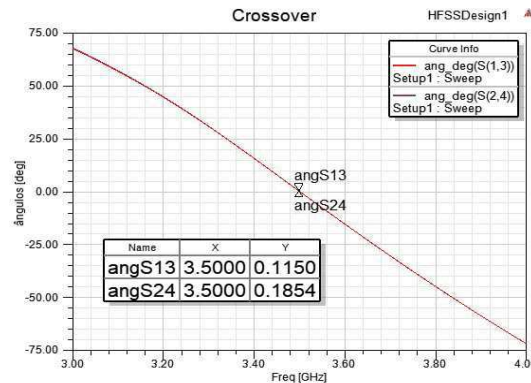
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 11: Parâmetros S do *crossover* quando a porta 2 é alimentada



Fonte: (Autora, 2021).

Figura 12: Defasamento, em graus, entre os sinais das portas 1 e 3 e 2 e 4



Fonte: (Autora, 2021).

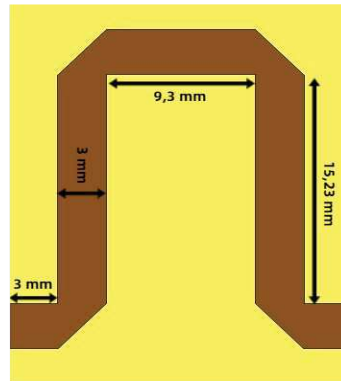
Como é possível observar pela análise dos gráficos, quando a porta 1 está alimentada, obteve-se $S_{12} = -23,28$ dB (< -20 dB) e $S_{14} = -22,25$ dB (< -20 dB), significando que as portas 2 e 4 estão de fato em isolamento, bem como $S_{11} = -29,24$ dB (< -20 dB), significando que pouca potência retorna para a porta de alimentação. Na porta 3 obteve-se $S_{13} = -1,00$ dB, próximo ao 0 dB desejado, e defasamento entre as portas 1 e 3 é de $0,11^\circ$, próximo a 0° .

Para o caso do sinal entrar na porta 2, obteve-se $S_{21} = -23,28$ dB (< -20 dB) e $S_{23} = -24,12$ dB (< -20 dB), significando que as portas 1 e 3 estão isoladas, bem como $S_{22} = -28,73$ dB (< -20 dB), significando que pouca potência retorna para a porta de alimentação. Na porta 4 obteve-se $S_{24} = -1,00$ dB, próximo ao 0 dB desejado, e defasamento entre as portas 2 e 4 é de $0,18^\circ$, próximo a 0° .

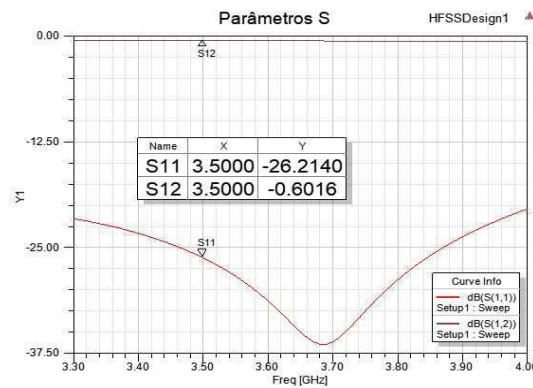
Todos os resultados são referidos à frequência central de 3,5 GHz e, sendo consideradas as perdas inerentes ao material, pode-se concluir que os resultados da simulação do *crossover* foram satisfatórios.

4.3 Defasador de -45°

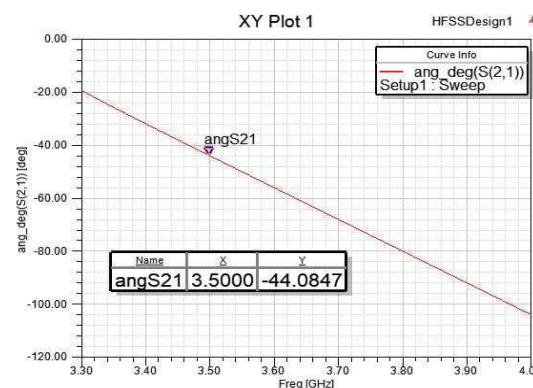
É esperado que o defasador projetado apresente defasamento entre as portas 1 e 2 de -45° . As Figuras 13, 14 e 15 ilustram o defasador simulado, o gráfico dos parâmetros S e o gráfico do defasamento entre as portas 1 e 2, respectivamente.

Figura 13: Defasador de -45° simulado

Fonte: (Autora, 2021).

Figura 14: Parâmetros S do defasador de -45° 

Fonte: (Autora, 2021).

Figura 15: Diferença de fase, em graus, entre os sinais da porta 1 e 2 do defasador de -45° 

Fonte: (Autora, 2021).

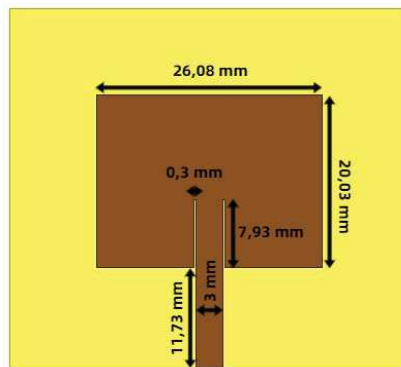
Analisando os gráficos, obteve-se $S_{12} = -0,60$ dB, próximo ao 0 dB almejado, bem como $S_{11} = -26,21$ dB (< -20 dB), significando que pouca potência retorna para a porta de alimentação, e defasamento entre as portas 1 e 2 de $-44,08^\circ$, próximo ao defasamento de -45° .

Todos os resultados são referidos à frequência central de 3,5 GHz e, sendo consideradas as perdas inerentes ao material, pode-se concluir que os resultados da simulação do defasador foram satisfatórios.

4.4 Antena

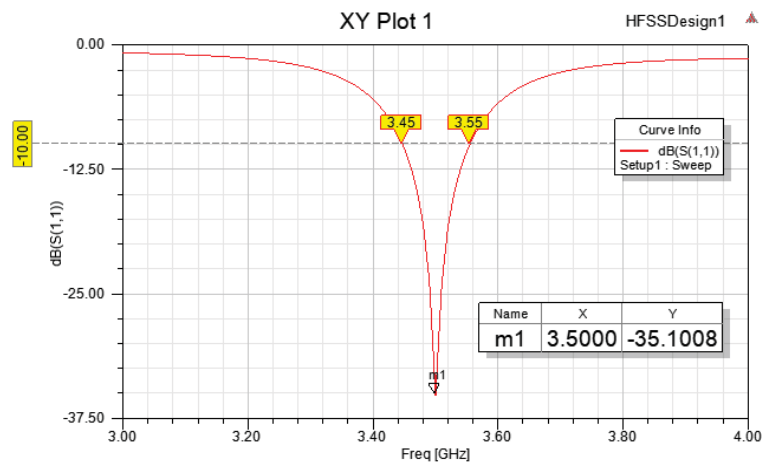
Para o projeto da antena, é esperado que a magnitude de S11 menor que -10 dB. As Figuras 16, 17 e 18 apresentam a antena simulada, o gráfico de S11 e o diagrama de irradiação 2D, respectivamente.

Figura 16: Antena simulada



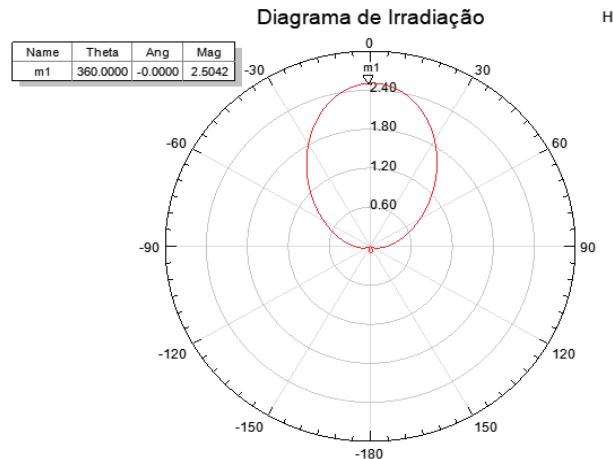
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 17: S11 da antena



Fonte: (Autora, 2021).

Figura 18: Diagrama de irradiação 2D da antena



Fonte: (Autora, 2021).

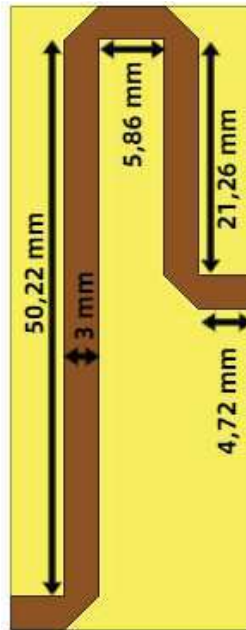
Observando os gráficos é possível perceber que $S_{11} = -35,10 \text{ dB}$ ($< -10 \text{ dB}$), que o ganho da antena é de $2,50 \text{ dBi}$ e a largura de banda é de 100 MHz . Todos os resultados são referidos à frequência central de $3,5 \text{ GHz}$. Pode-se concluir que os resultados alcançados na simulação da antena foram satisfatórios.

4.5 Linhas de transmissão sem defasamento

Para as simulações do projeto, foi necessária a criação de duas linhas de transmissão sem defasamento, aqui denominadas Linha 1 e Linha 2, com objetivo de garantir que o formato final da Matriz de Butler fosse alcançado, sem que com isso houvesse alguma deformação significativa do sinal. Dessa forma, é esperado que, para ambas as linhas, S_{12} (ou S_{21}) = 0 dB , bem como defasamento igual 0° entre as portas 1 e 2.

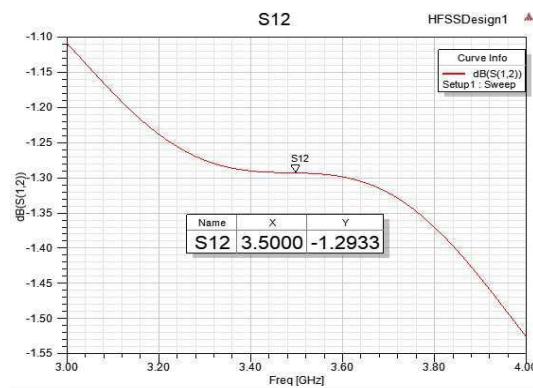
Nas Figuras 19, 20 e 21 estão ilustradas a Linha 1 simulada, o gráfico do parâmetro S_{12} da Linha 1 e o gráfico com o defasamento, em graus, entre as portas 1 e 2 da Linha 1, respectivamente. Já as Figuras 22, 23 e 24 apresentam a Linha 2 simulada, o gráfico do parâmetro S_{21} da Linha 2 e o gráfico com o defasamento, em graus, entre as portas 1 e 2 da Linha 2, respectivamente.

Figura 19: Linha 1 simulada



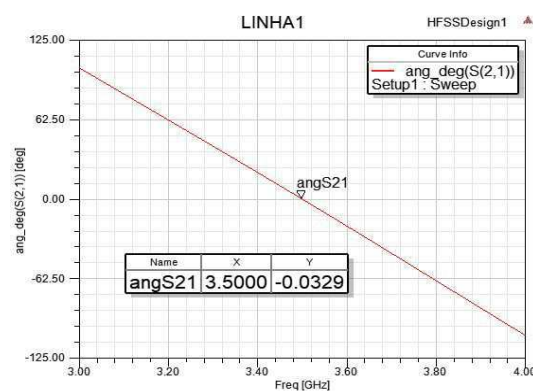
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 20: S12 da Linha 1



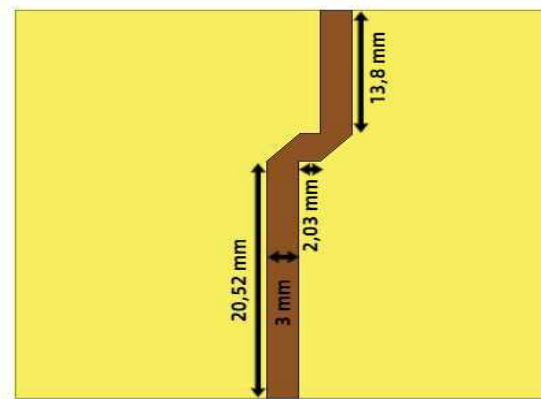
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 21: Diferença de fase, em graus, entre os sinais da porta 1 e 2 da Linha 1



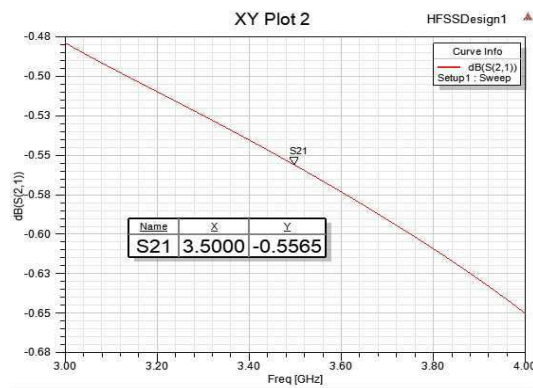
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 22: Linha 2 simulada



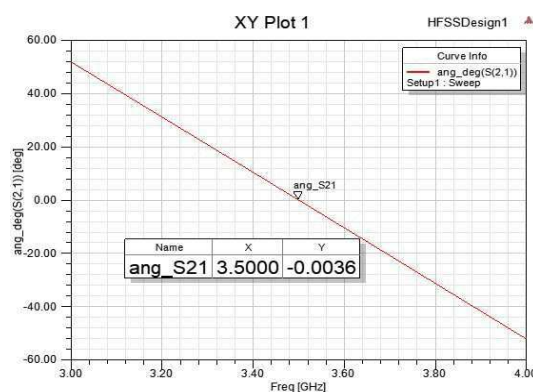
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 23: S21 da Linha 2



Fonte: (Autora, 2021).

Figura 24: Diferença de fase, em graus, entre os sinais da porta 1 e 2 da Linha 2



Fonte: (Autora, 2021).

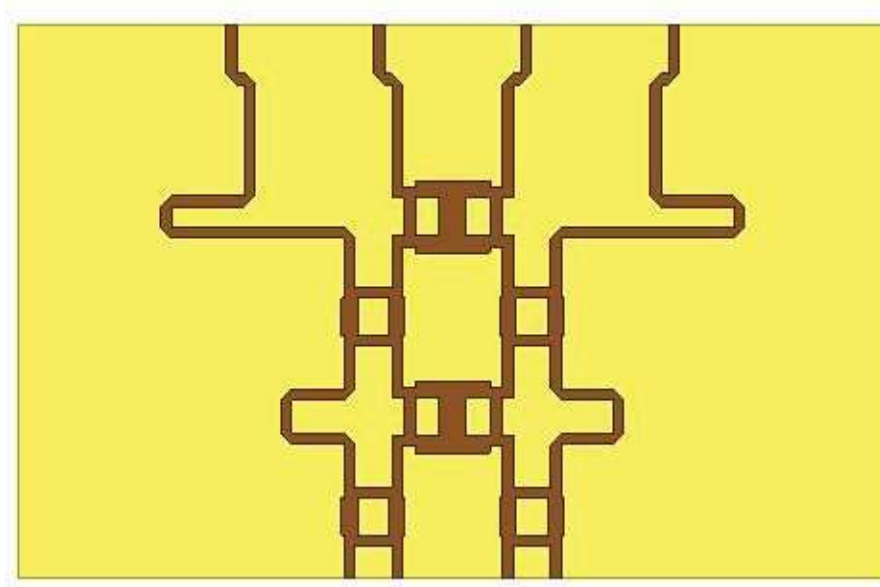
Analisando os gráficos, para a Linha 1, obteve-se $S_{12} = -1,29$ dB, próximo ao 0 dB desejado, e defasamento entre as portas 1 e 2 é de $0,03^\circ$, próximo a 0° . Já para a Linha 2, obteve-se $S_{21} = -0,55$ dB, próximo ao 0 dB almejado, e defasamento entre as portas

1 e 2 de, aproximadamente, 0° . Todos os resultados são referidos à frequência central de 3,5 GHz e, sendo consideradas as perdas inerentes ao material, pode-se concluir que os resultados da simulação da Linha 1 e Linha 2 foram satisfatórios.

4.6 Matriz de Butler

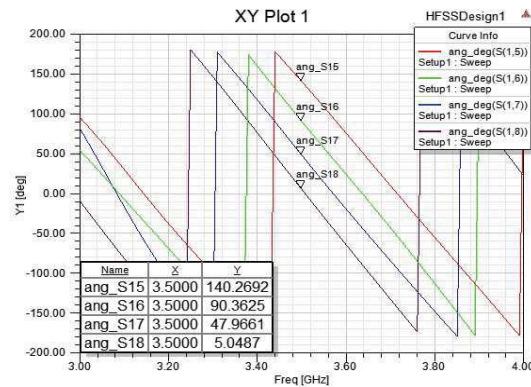
Depois que cada parte foi projetada, todas foram combinadas para obter o leiaute de Matriz de Butler. A Figura 25 apresenta a Matriz de Butler simulada. Já a Figura 26 apresenta o gráfico dos defasamentos entre a entrada 1 e as saídas 5, 6, 7 e 8, quando a porta 1 é alimentada. A Figura 27 ilustra o gráfico dos defasamentos entre a entrada 2 e as saídas 5, 6, 7 e 8, quando a porta 2 é alimentada. Em seguida, temos a Figura 28 que ilustra o gráfico dos defasamentos entre a entrada 3 e as saídas 5, 6, 7 e 8, quando a porta 3 é alimentada. Por último, a Figura 29 apresenta o gráfico dos defasamentos entre a entrada 4 e as saídas 5, 6, 7 e 8, quando a porta 4 é alimentada. Com base nos dados da Tabela 1, foi construída uma nova tabela, Tabela 3, que relaciona os valores de defasamento teóricos e valores de defasamento obtidos em simulação para melhor análise dos resultados.

Figura 25: Matriz de Butler simulada



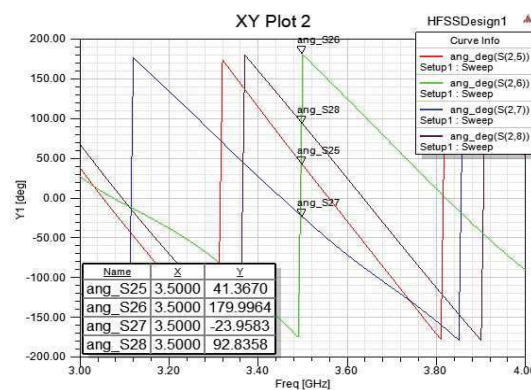
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 26: Defasamento entre a entrada 1 e as saídas 5, 6, 7 e 8, da Matriz de Butler, quando a porta 1 é alimentada



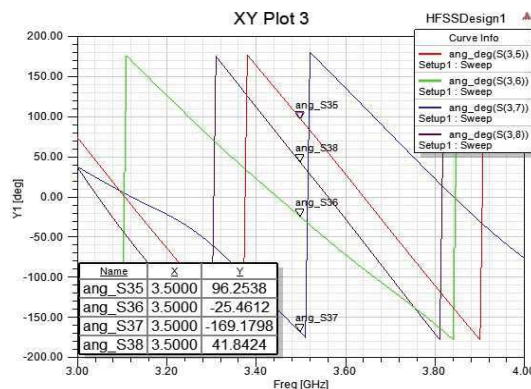
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 27: Defasamento entre a entrada 2 e as saídas 5, 6, 7 e 8, da Matriz de Butler, quando a porta 2 é alimentada



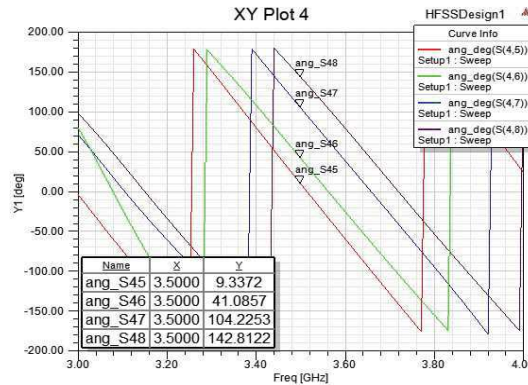
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 28: Defasamento entre a entrada 3 e as saídas 5, 6, 7 e 8, da Matriz de Butler, quando a porta 3 é alimentada



Fonte: (Autora, 2021).

Figura 29: Defasamento entre a entrada 4 e as saídas 5, 6, 7 e 8, da Matriz de Butler, quando a porta 4 é alimentada



Fonte: (Autora, 2021).

Tabela 3: Comparativo dos valores de defasamento teóricos e simulados entre as entradas e as saídas da Matriz de Butler 4x4 simulada

	Porta 1	Porta 2	Porta 3	Porta 4	
Porta 5	135° 140,26°	45° 41,36°	90° 96,25°	0° 9,33°	Teórico Simulado
Porta 6	90° 90,36°	180° 179,99°	-45° -25,46°	45° 41,08°	Teórico Simulado
Porta 7	45° 47,96°	-45° -23,95°	180° 190,83°	90° 104,22°	Teórico Simulado
Porta 8	0° 5,04°	90° 92,83°	45° 41,84°	135° 142,81°	Teórico Simulado
Diferença de fase	-45° -45,07°	135° 137,16°	-135° -138,14°	45° 44,49°	Teórico Simulado (MÉDIA)
ERRO	0,15%	1,6%	2,33%	1,13%	

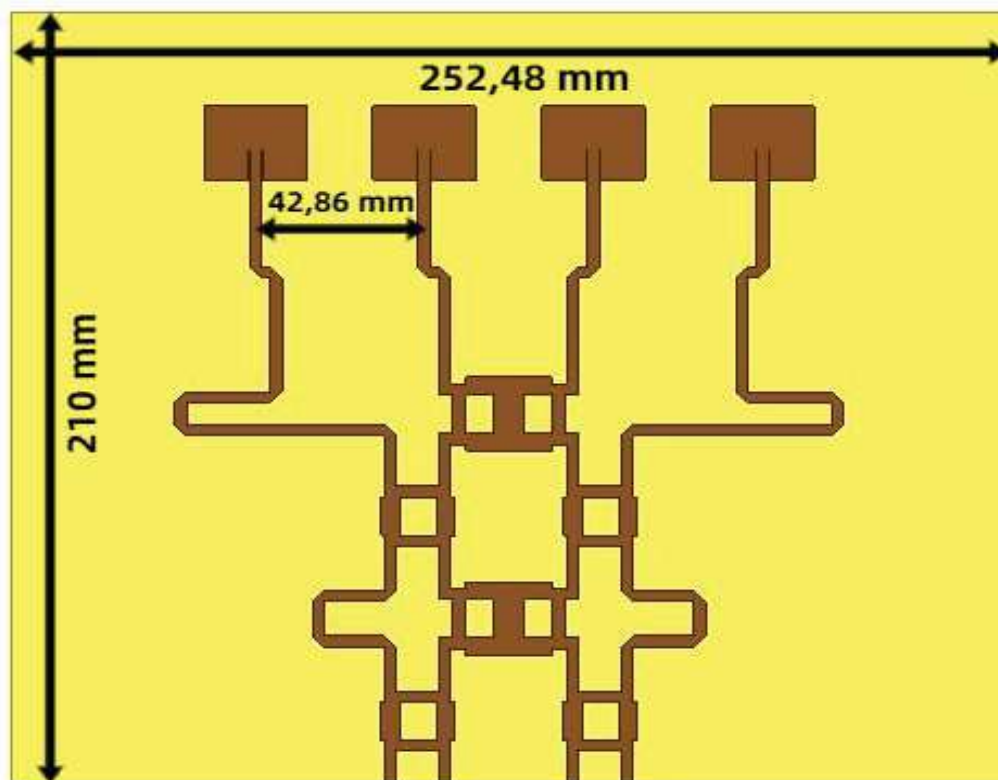
Fonte: (Autora, 2021).

A diferença de fase entre as portas de saída de uma Matriz de Butler é um parâmetro importante para a validação do fenômeno de *beamforming*. Dessa forma, a partir da análise dos gráficos e dos dados dispostos em tabela, e considerando as perdas do material, é possível perceber que a Matriz de Butler projetada funciona de forma satisfatória, uma vez que a média dos valores da diferença de fase entre as portas de saída obtidos em simulação estão muito próximos dos referenciados em teoria, com erros percentuais relativamente baixos. Todos os valores encontrados em simulação são referentes à frequência central de 3,5 GHz.

4.7 Matriz de Butler com arranjo de antenas

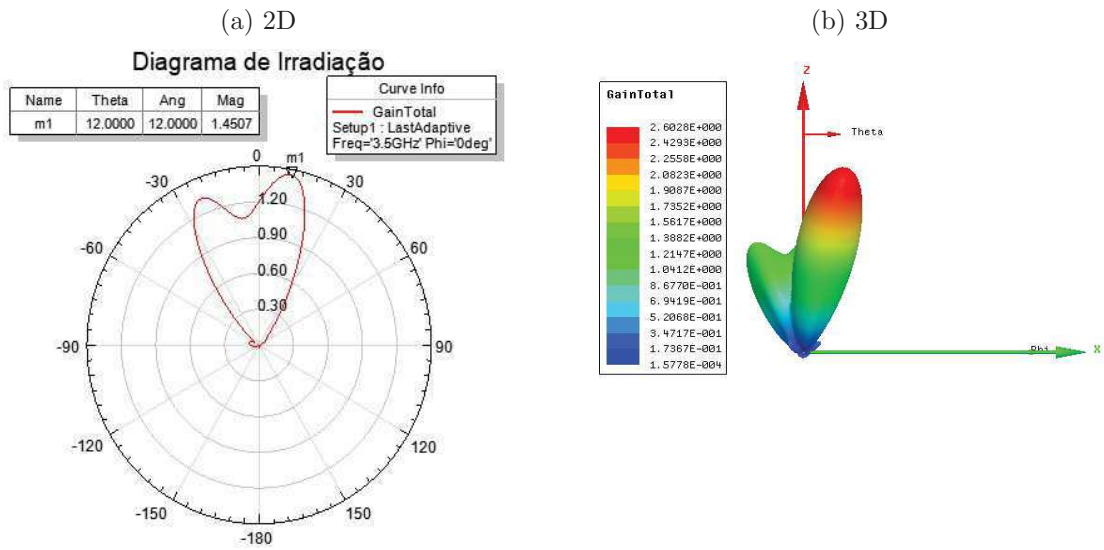
O próximo passo é conectar a Matriz de Butler a um arranjo de antenas e verificar os resultados. A Figura 30 apresenta o sistema projetado. Já as Figuras 31, 32, 33 e 34 ilustram os diagramas de irradiação 2D e 3D do sistema quando as portas 1, 2, 3 e 4 são alimentadas, respectivamente. Dessa forma, é possível analisar o comportamento da estrutura. A Tabela 4 relaciona os valores teóricos do ângulo de varredura θ da Tabela 2 com os encontrados durante a simulação de forma a melhorar análise. Os elementos de antena estão espaçados de uma distância $d = \frac{\lambda_0}{2} \approx 42,86$ mm.

Figura 30: Matriz de Butler com arranjo de antenas simulada



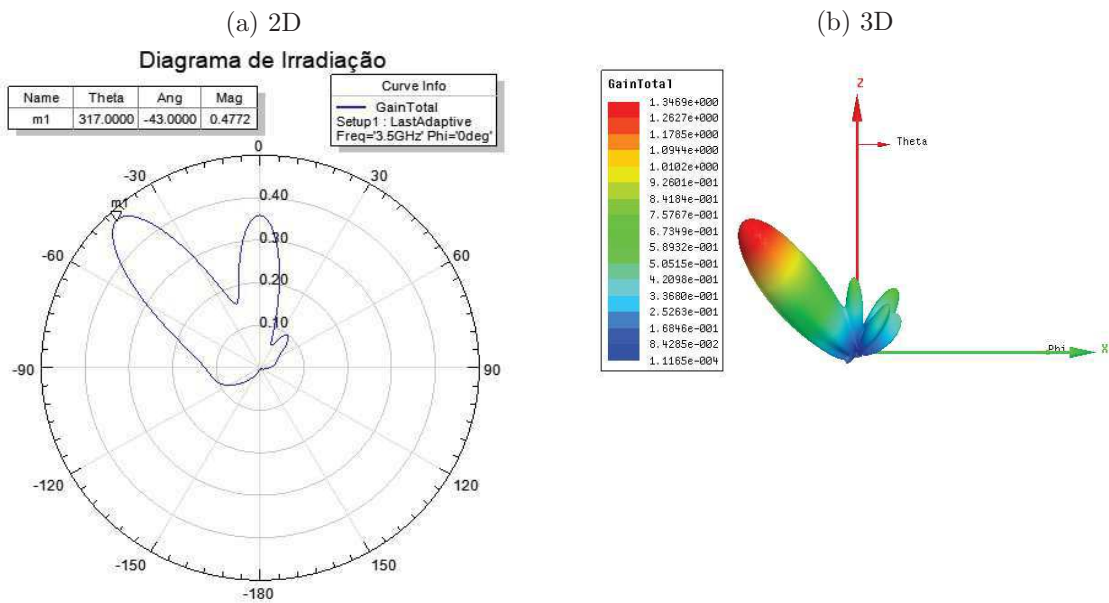
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 31: Diagramas de Irradiação do sistema quando a porta 1 é alimentada



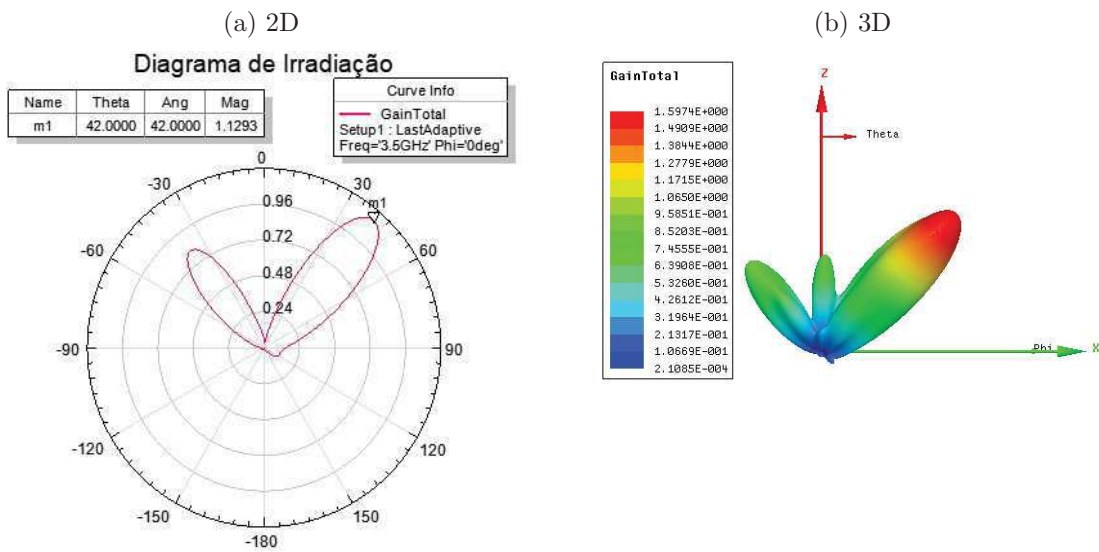
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 32: Diagramas de Irradiação do sistema quando a porta 2 é alimentada



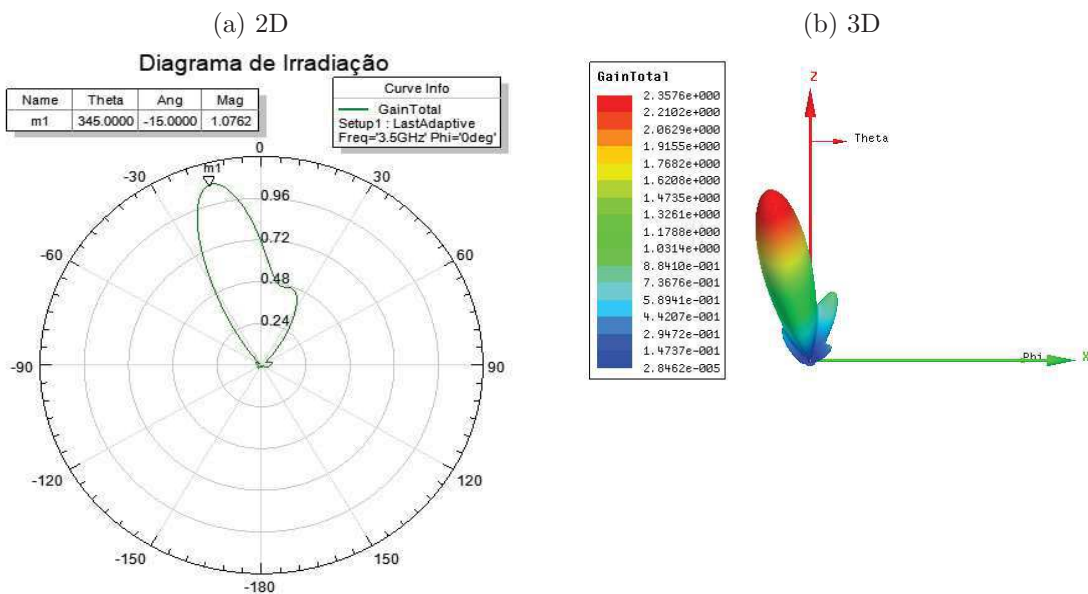
Fonte: (Autora, 2021).

Figura 33: Diagramas de Irradiação do sistema quando a porta 3 é alimentada



Fonte: (Autora, 2021).

Figura 34: Diagramas de Irradiação do sistema quando a porta 4 é alimentada



Fonte: (Autora, 2021).

Tabela 4: Comparativo entre os ângulos de varredura θ teóricos e simulados do sistema

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
Teórico	14,5°	-48,6°	48,6°	-14,5°
Simulado	12°	-43°	42°	-15°
ERRO	17,24%	11,52%	13,58%	3,45%

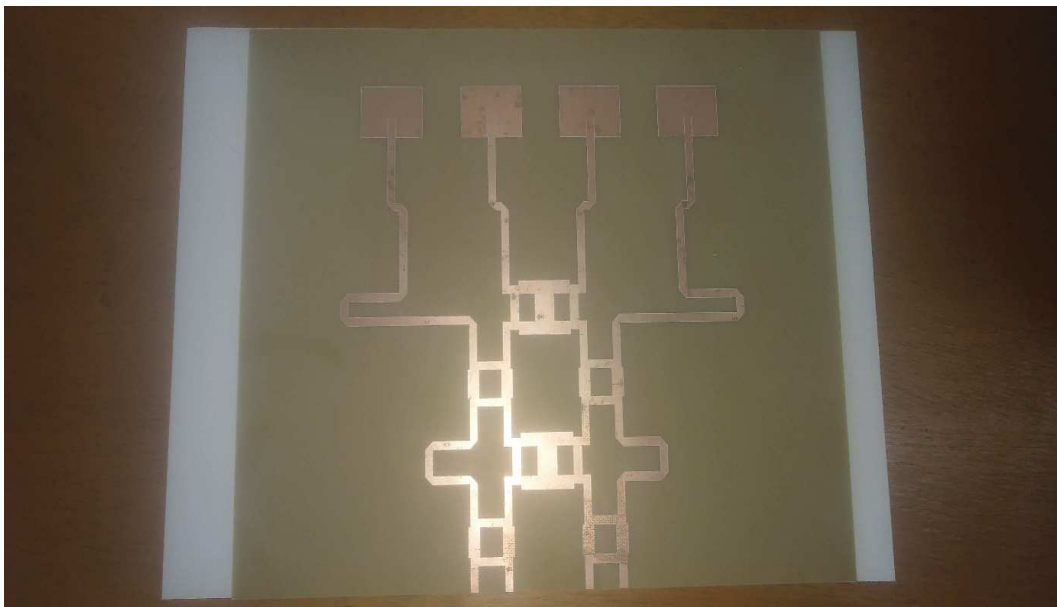
Fonte: (Autora, 2021).

A partir dos dados presentes nos gráficos e na tabela, é possível perceber que os ângulos de varredura encontrados em simulação são bem próximos aos referenciados em teoria. Embora o erro percentual seja relativamente alto, isso se justifica pelo fato do ângulo de varredura depender da distância entre os elementos de antena, bem como da diferença de fase entre as portas de saída da matriz, cujos valores encontrados são aproximações. Entretanto, é visível que para cada porta alimentada individualmente, o sinal emitido pelas antenas modifica sua direção. Portanto, é confirmada a ocorrência do fenômeno de varredura de feixes (*beamforming*) para o sistema projetado à 3,5 GHz na tecnologia 5G.

4.7.1 Protótipo da Matriz de Butler com arranjo de antenas

Após as simulações no *software* HFSS, a Matriz de Butler com arranjo de antenas foi construída, conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35: Matriz de Butler com arranjo de antenas construída



Fonte: (Autora, 2021).

Em razão das condições desfavoráveis impostas pela pandemia da COVID 19, as medições do protótipo construído não puderam ocorrer como previsto.

5 Conclusão

No trabalho desenvolvido foi realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos de varreduras de feixes (*beamforming*), Matriz de Butler e seus componentes, bem como das antenas planares.

Em seguida, foi desenvolvido um sistema de antena inteligente para atuar na banda de operação do 5G à 3,5 GHz, composto por uma Matriz de Butler 4x4 e um arranjo de antenas planares acopladas utilizando o *software* HFSS da ANSYS®.

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 observados no diagrama de irradiação 2D e 3D foram satisfatórios, observando-se concordância entre as simulações realizadas e a teoria.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se destacar: validar por meio de medições o protótipo construído e utilizar de técnicas para miniaturizar da estrutura simulada.

Referências Bibliográficas

- VIEIRA DOS SANTOS, Daniel Humberto. Controlo do Diagrama de Radiação de Agrupamento de Antenas. Funchal, 2015. 174 p. Dissertação (Engenharia de Telecomunicações) - Universidade de Madeira.
- AL HABIBI, Hani Abdul Rahman. Design of a 4x4 Butler Matrix for Vehicle Radar Beamforming Antenna Systems at 24 GHz. Gaza, 2014. 90 p. Tese (Engenharia Elétrica) - The Islamic University of Gaza.
- NACHOUANE, Hamza et al. Broadband 4×4 Butler matrix using wideband 90° hybrid couplers and crossovers for beamforming networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMEDIA COMPUTING AND SYSTEMS (ICMCS). 2014, Marrocos.
- SFAR, Imen; OSMAN, Lotfi; GHARSALLAH, Ali. Design of a 4×4 butler matrix for beamforming antenna applications. In: PROCEEDINGS OF 2014 MEDITERRANEAN MICROWAVE SYMPOSIUM (MMS2014). 2014, Marrocos.
- HUANG, Kao-Cheng; EDWARDS, David J.. Millimetre Wave Antennas for Gigabit Wireless Communications: A Practical Guide to Design and Analysis in a System Context. John Wiley Sons, 2008.
- HONG, Wonbin et al. Study and prototyping of practically large-scale mmWave antenna systems for 5G cellular devices. IEEE Communications Magazine, v. 52, n. 9, p. 63-69, 12 setembro 2014.
- NASCIMENTO, Rafael dos Santos do . Desenvolvimento de antena inteligente utilizando varredura de feixe para aplicação WiMax a 5,8 GHz. Campina Grande, PB, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.
- YAMADA, Yoshihide et al. Unequally Element Spacing Array Antenna with Butler Matrix Feed for 5G Mobile Base Station. In: 2018 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELEMATICS AND FUTURE GENERATION NETWORKS (TAFGEN). 2018, Malásia. 5 p.