Universidade de Brasília – UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia - FCTE
Engenharia Eletrônica

Implementação de uma Matriz de Butler na faixa de 915 MHz para formação de feixes direcionados

Walter José R. M. Júnior

Orientador: Dr. Daniel Costa Araújo



UnB – Universidade de Brasília

FCTE – Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia

Engenharia Eletrônica

Implementação de uma Matriz de Butler na faixa de 915 MHz para formação de feixes direcionados

Walter José R. M. Júnior

Orientador: Daniel Costa Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso
Engenharia Eletrônica

Brasília/DF, Fevereiro de 2025

UnB – Universidade de Brasília

FCTE – Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia

Engenharia Eletrônica

Implementação de uma Matriz de Butler na faixa de 915 MHz para formação de feixes direcionados

Walter José R. M. Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de bacharel em engenharia eletrônica

Aprovada por:

Daniel Costa Araújo

(Orientador)

Prof. Leonardo Aguayo, PhD

Prof. Sébastien Roland Marie Joseph Rodineau, PhD

Brasília/DF, Fevereiro de 2025

Ficha Catalográfica

José R. M. Júnior, Walter
Implementação de uma Matriz de Butler na faixa de 915 MHz para formação de feixes direcionados, [Distrito Federal], 2025.
41p., 210 × 297 mm (FCTE/UnB Gama, Bacharelado em Engenharia Eletrônica, 2022).
Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, Engenharia Eletrônica

1. Matriz de Butler
2. Beamforming
3. *Acopladores Híbridos*
4. Rede de Antenas

I. FCTE/UnB.
II. Título (série)

Referência

José R. M. Júnior, Walter (2025). Implementação de uma Matriz de Butler na faixa de 915 MHz para formação de feixes direcionados. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Eletrônica, Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 41p.

Cessão de Direitos

Autor: Walter José R. M. Júnior

Título: Implementação de uma Matriz de Butler na faixa de 915 MHz para formação de feixes direcionados

Grau: Bacharel em Engenharia Eletrônica

Ano: 2025

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

juniormoraes2211@outlook.com

Brasília, DF – Brasil

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos orixás e meus ancestrais que me acompanham, que me guiaram e fortaleceram durante todo o percurso, mesmo nos momentos em que fraquejei. Agradeço também à minha família, que sempre esteve ao meu lado com todo o suporte necessário. Sem eles, minha jornada e este trabalho não seriam possíveis. Por fim, agradeço aos professores que passaram pela minha graduação, orientando e fornecendo a base de conhecimento tão importante para minha carreira.

Resumo

O objetivo deste trabalho é implementar uma matriz de Butler 4x4 com um conjunto de antenas, utilizando micro-linha de transmissão na frequência de 915 MHz com substrato FR4 com $0,8$ mm de espessura. Para isso, foram utilizados números definidos dos componentes que fazem parte da arquitetura da matriz de Butler, sendo eles o acoplador híbrido em quadratura, o *Crossover* (Cruzamento de linhas) e o defasador fixo. Dada a simulação das linhas com substrato individual de cada componente, os acopladores projetados obtiveram as perdas de inserção de $3,5$ dB com diferença de fase de $89,9°$ nas saídas. Além da implementação do acoplador em micro-linha, a simulação do acoplador utilizando um circuito LC obteve resultados muito próximos, sendo uma alternativa de menor custo, com perdas de inserção próximas a $3,0$ dB e defasagem de $90°$. Para o cruzamento das linhas, foram utilizado dois acopladores híbridos em cascata, com perdas de inserção de $-0,7$ dB, em 915 MHz. Já o defasador apresentou bons resultados, com $-45,0°$ de defasagem, e perdas de inserção e perdas de retorno de $0,5$ dB. Por fim, para a matriz de Butler integrada com a rede de antenas impressas obteve-se perda de retorno em torno de 20 dB e direções dos feixes de $-75°$, $-120°$, $117°$ e $81°$.

Abstract

The objective of this work is to implement a 4x4 Butler array with a set of antennas, using a micro-transmission line at a frequency of 915 MHz with a FR4 substrate with a thickness of 0.8 mm. For this purpose, a defined number of components that are part of the Butler array architecture were used, namely the hybrid quadrature coupler, the crossover and the fixed phase shifter. Given the simulation of the lines with individual substrate for each component, the designed couplers obtained insertion losses of 3.5 dB with a phase difference of 89.9° at the outputs. In addition to the implementation of the micro-line coupler, the simulation of the coupler using an LC circuit obtained very similar results, being a lower cost alternative, with insertion losses close to 3.0 dB and phase shift of 90°. For the crossing of the lines, two hybrid couplers in cascade were used, with insertion losses of -0.7 dB, at 915 MHz. The phase shifter presented good results, with $-45.0°$ of phase shift, and insertion losses and return losses of 0.5 dB. Finally, for the Butler array integrated with the printed antenna network, return loss of around 20 dB and beam directions of $-75°$, $-120°$, 117° and 81° were obtained.

Sumário

1 Introdução **1**

1.1 Contextualização 1

1.2 Objetivo Geral 4

1.3 Revisão Bibliográfica 5

2 Fundamentação Teórica **6**

2.1 Formação de Feixes 6

2.2 Matriz de Butler 6

2.2.1 Acoplador Híbrido em Quadratura 8

2.2.2 Cruzamento de linhas 9

2.2.3 Defasador Fixo 10

2.3 Circuito Equivalente LC para o Acoplador Híbrido em Quadratura 11

2.4 Antenas Impressas 12

3 Problema a ser resolvido **15**

3.1 Problema Principal 15

3.2 Desafios Técnicos 15

4 Metodologia **16**

4.1 Projeto dos Componentes da Matriz de Butler 16

4.1.1 Acoplador Híbrido em Quadratura 17
4.1.2 Cruzamento das Linhas 18
4.1.3 Defasador Fixo 19
4.2 Projeto da Matriz de Butler 20
4.2.1 Espaçamentos 20
4.2.2 Modelo de Placa com Conector SMA 23
4.2.3 Modelo de Placa com as Antenas Impressas 24

5 Resultados e Discussões **25**

5.1 Avaliação dos Componentes da Matriz de Butler 25
5.1.1 Acoplador Híbrido em Quadratura 25
5.1.2 Cruzamento das linhas 28
5.1.3 Defasador 30
5.2 Avaliação da Matriz de Butler 32
5.2.1 Integração com Rede de Antenas e Conectores SMA 34

6 Conclusão e Futuros Trabalhos **38**

Lista de Tabelas

5.1 Perdas de Inserção em dB para cada porta de saída referente as portas de entrada.. 33

5.2 Perdas de retorno em dB. 33

5.3 Diferenças de fase ψ nas portas de saída da matriz. 34

Lista de Figuras

1.1 Panorama do roteiro sem fio até o ano 2035. 1

1.2 Número de dispositivos IoT conectados no mundo de até 2033. 2

1.3 Esquema *MIMO* básico com três antenas de transmissão e três antenas de recepção. 3

2.1 Diagrama de Blocos da Matriz de Butler. 7

2.2 Valores de ψ para a matriz 4x4. 7

2.3 Geometria do acoplador híbrido em quadratura. 8

2.4 Geometria do Crossover. 9

2.5 Topologia do circuito equivalente para Acoplador Híbrido em quadratura. 11

2.6 Geometria das antenas impressas retangulares. 12

2.7 Efeito de campos marginais laterais. 13

2.8 Inserção dos espaçamentos. 13

4.1 Parâmetros W e L da linha de transmissão. 16

4.2 Esquemático realizado para o Acoplador. 17

4.3 Circuito LC para o Acoplador. 18

4.4 Esquemático realizado para o componente de cruzamento de linhas. . . . 18

4.5 Esquemático realizado para o defasador. 19

4.6 Esquemático realizado para a Matriz de Buttler. 20

4.7 Esquemático realizado para a Matriz de Buttler após alinhamento. 21

4.8 Esquemático realizado para a Matriz de Buttler com espaçamento para as antenas. 21

4.9 Esquemático final realizado para a Matriz de Buttler. 22

4.10 Medidas do conector utilizado. 23

4.11 CAD do conector modelado. 23

4.12 Modelo para simulação da transição. 24

4.13 Valores usados para construção da rede de antenas. 24

5.1 Comportamento do acoplador híbrido em parâmetros S 25

5.2 PCB Layout do Acoplador Híbrido 26

5.3 Diferenças de fase entre as saídas Acoplador Híbrido 26

5.4 Resultados da simulação do circuito LC 27

5.5 Resultados das fases de saída da simulação do circuito LC 27

5.6 PCB Layout do Crossover 28

5.7 Resultados da simulação do cruzamento de linhas em parâmetros S. . . . 29

5.8 Resultado da defasagem após otimização. 29

5.9 PCB Layout do Phase-Shifter 30

5.10 Resultado da defasagem do componente. 30

5.11 Resultados das perdas no defasador fixo. 31

5.12 PCD completa da Matriz de Butler. 32

5.13 Resultados da Simulação da Matriz de Butler. 32

5.14 Arranjo final da matriz de Butler com a rede de antenas impressas. . . . 34

5.15 Diagramas normalizados de radiação dos ganhos simulados. 35

5.16 Vista da transição simulada com o conector. 35

5.17 Perdas na transição com o conector 36

5.18 Projeto final da matriz de Butler com a rede de antenas impressas e conectorizado. 37

Lista de Símbolos, Nomenclaturas e Abreviações

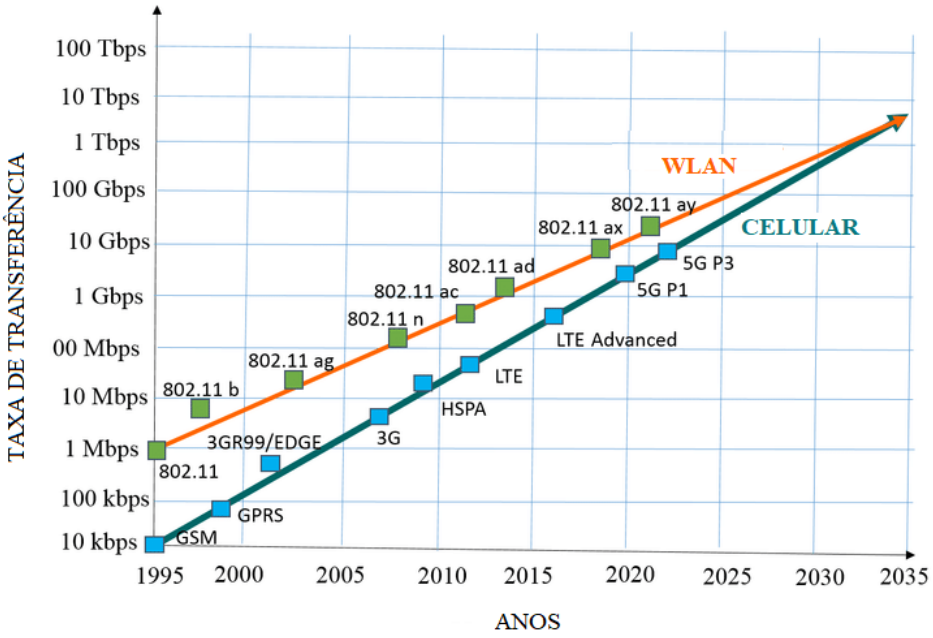
$WLAN$	–	*Wireless Local Area Network*
$Wi\text{-}Fi$	–	*Wireless Fidelity*
IoT	–	*Internet of Things*
$LoRa$	–	*Long Range*
$LPWAN$	–	*Low-Power Wide-Area Networks*
$MIMO$	–	*Multiple Input - Multiple Output*
SMD	–	*Surface Mounted Device*
ADS	–	*Advanced Desing System*
TB/s	–	*Terabytes por segundo*
GHz	–	*Giga Hertz*
MHz	–	*Mega Hertz*
ψ	–	*Diferença de Fase*
dB	–	*Decibéis*
λ_g	–	*Comprimento de Onda Guiada*
f_0	–	*Frequência Central*
Δl	–	*Diferença de Comprimento de Linha*
θ	–	*Defasagem*
W	–	*Largura*
l	–	*Comprimento*
h	–	*Espessura do substrato*
ϵ_r	–	*Constante Dielétrica*
ϵ_{reff}	–	*Constante Dielétrica Efetiva*
MHz	–	*Mega Hertz*
Z	–	*Impedância*
L	–	*Indutância*
C	–	*Capacitância*
ω	–	*Frequência angular*
R_{in}	–	*Resistência de Entrada*
G_1	–	*Condutância Própria*
G_{12}	–	*Condutância Mútua*
c	–	*Velocidade da Luz*

1 Introdução

1.1 Contextualização

Com o crescente uso das redes sem fio para diversas aplicações e o avanço tecnológico dos dispositivos eletrônicos, vem se aprimorando a forma e a capacidade de transmitir informações, cada vez em maior volume. De acordo com a Figura 1.1, existem projeções das taxas de transmissão maiores que 1 Tb/s para as tecnologias celular e WLAN até 2035.

Figura 1.1. Panorama do roteiro sem fio até o ano 2035.



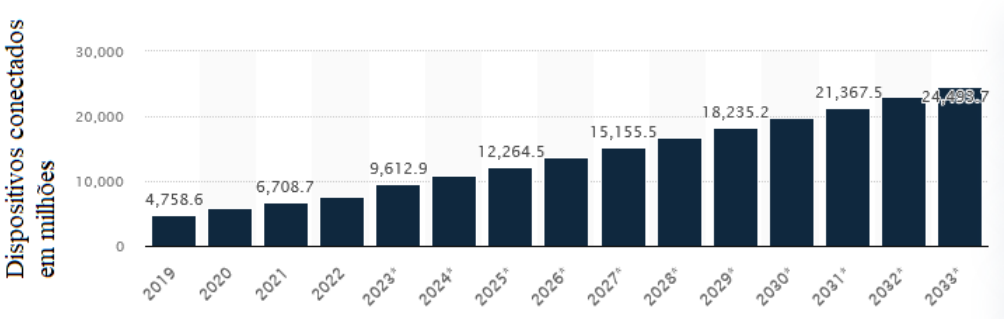
Fonte: (Elayan *et al.*, 2019).

Esse crescimento significativo do uso sem fio levou a comunidade de pesquisa para explorar regiões apropriadas no espectro de rádio para satisfazer as crescentes necessidades dos indivíduos (Elayan *et al.*, 2019).

Surge então a necessidade de aperfeiçoar as tecnologias existentes, de modo a aproveitar o uso do espectro. Esta questão pode ser vista em termos do aumento da capacidade de utilização, maior potência de sinal e padrões de radiação direcional (Cao e Chin, 2017) (Priyadarshan e Thenmozhi, 2017) (Zhu e Sun, 2019).

Uma alternativa é a utilização da faixa de 915 MHz para as tecnologias sem fio, massivamente utilizadas nas faixas de 2,4 GHz, 5 GHz e 6 GHz, sendo uma boa alternativa para as aplicações em IoT, já utilizada para os padrões LoRa e Zigbee. É mostrado que comunicações em 915 MHz podem levar à redução da perda de caminho em espaço livre, diminuição do orçamento de link e interação reduzida com o corpo em comparação com a banda de 2,45 GHz (Kumar, 2019).

Figura 1.2. Número de dispositivos IoT conectados no mundo de até 2033.

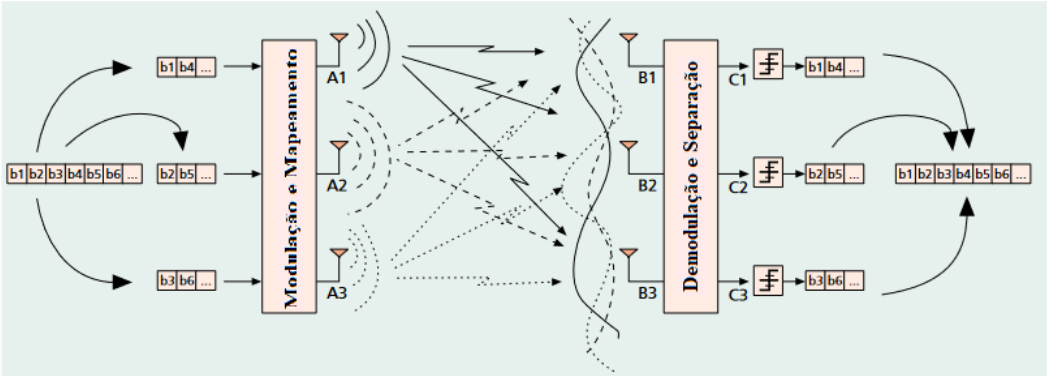


Fonte: Adaptado (Sujay Vailshery, 2024).

Pela figura 1.2 é visto que o crescimento de dispositivos IoT conectados pode passar dos 20 milhões no mundo, desse modo é mais uma vez visto que para os dispositivos operando em 915 MHz é necessário que a transmissão e recepção sejam mais eficientes e direcionadas. Os sistemas de comunicação sem fio estão frequentemente sujeitos a grandes flutuações devido ao enfraquecimento por multicaminhos e interferências, o que diminui significativamente a eficiência espectral e a capacidade desses sistemas (Banafa, 2018). Para diminuir esses problemas, é possível construir uma arquitetura de transmissão que que produz múltiplos feixes, uma matriz de Butler.

De acordo com (Tiong Desmond, 2001), a matriz de Butler é um elemento passivo na formação de uma rede de feixes em diferentes direções. Pela sua implementação menos complexa com micro-linhas de transmissão que as demais arquiteturas, pode ser considerada uma alternativa na transmissão de sinais.

Figura 1.3. Esquema *MIMO* básico com três antenas de transmissão e três antenas de recepção.



Fonte: Adaptado (Gerhard P., 2014).

Como a matriz de Butler possui mais de uma entrada e saída, pode ser utilizada uma rede com múltiplas antenas. A rede explora transmissões multipercurso independentes entre os diferentes elementos da antena na estação-base e o receptor (Stevanovic, 2003).

Essa rede é chamada de *MIMO* - *Multiple Input* - *Multiple Output*, ou seja, múltiplas entradas e múltiplas saídas, capaz de aumentar a eficiência espectral da transmissão, dado que mais dados podem ser transmitidos e recebidos em um intervalo de tempo. Além disso, há sistemas que por terem mais de uma antena, podem configurar quantas serão de transmissão e quantas serão de recepção. Assim, uma estação-base pode se comunicar com mais de um dispositivo ao mesmo tempo.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é implementar uma matriz de Butler 4x4 com um conjunto de antenas impressas, utilizando micro-linha de transmissão na faixa de 915 MHz para as tecnologias sem fio. Em decorrência, será possível direcionar os feixes de acordo com a excitação individual das 4 portas de entrada, proporcionando uma possibilidade para a tecnologia de redes sem fio.

1.2.0.1 Objetivos Específicos

- Projetar uma matriz de Butler 4x4, 4 entradas e 4 saídas, utilizando micro-linhas de transmissão na frequência de 915 MHz;
- Validar os elementos individuais necessários para a matriz de Butler (acoplador híbrido em quadratura, defasadores e elemento cruzador de sinais);
- Validar o funcionamento da matriz de Butler com base no direcionamento de feixes por meio da excitação individual das 4 portas de entrada;
- Integrar a matriz de Butler a um conjunto de antenas impressas;
- Projetar em CAD os conectores SMD e validá-los;

1.3 Revisão Bibliográfica

Esta revisão tem por objetivos obter conhecimentos acerca do tema tratado neste trabalho, de modo que se obtenha o aprendizado necessário para este projeto e suas peculiaridades, a compreensão do contexto em que se encaixa a aplicação deste projeto, conhecer os conceitos que estão por trás e em torno do tema, para no fim poder realizar o projeto e verificar os resultados obtidos com este trabalho de acordo com o referencial teórico construído.

Para esta revisão, buscou-se trabalhos como dissertações, teses, publicações em revistas e livros que abordem o assunto principal deste trabalho e os conceitos necessários para a produção e entendimento, de forma relevante. A busca se deu principalmente utilizando as bases de dados do IEEE e do Research Gate, com as palavras-chave: Matriz de Butler 'E' (Beamforming 'OU' Formação de Feixes) 'E' (IoT 'OU' Internet of Things 'OU' Internet das Coisas) 'E' (915 MHz 'OU' 900MHz) 'E' Rede de Antenas 'E' (Antenas Patch 'OU' Antenas Impressas).

Foram encontrados trabalhos referentes ao projeto da matriz de Butler que obtiveram os resultados esperados e condizentes, dentro do que se propuseram, que serviram de base teórica para a implementação. Mas não foram encontrados trabalhos em que fossem projetados para operar em 915 MHz. Os trabalhos referentes à contextualização e problemática trouxeram uma visão das tecnologias empregadas e os desafios atuais e futuros, que necessitam de uma solução e ajudam a compor o escopo deste trabalho. Por fim, alguns trabalhos foram necessários para compor a base de conhecimento necessário para a elaboração do projeto e para as discussões sobre os resultados.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Formação de Feixes

O termo *beamforming* (formação de feixes) deriva do fato de que os primeiros filtros espaciais eram projetados para formar feixes para receber um sinal irradiando de um local específico e atenuar sinais de outro local (Van Veen, 2009). Essa técnica possibilita então direcionar os feixes para uma determinada localização, diminuindo as interferências.

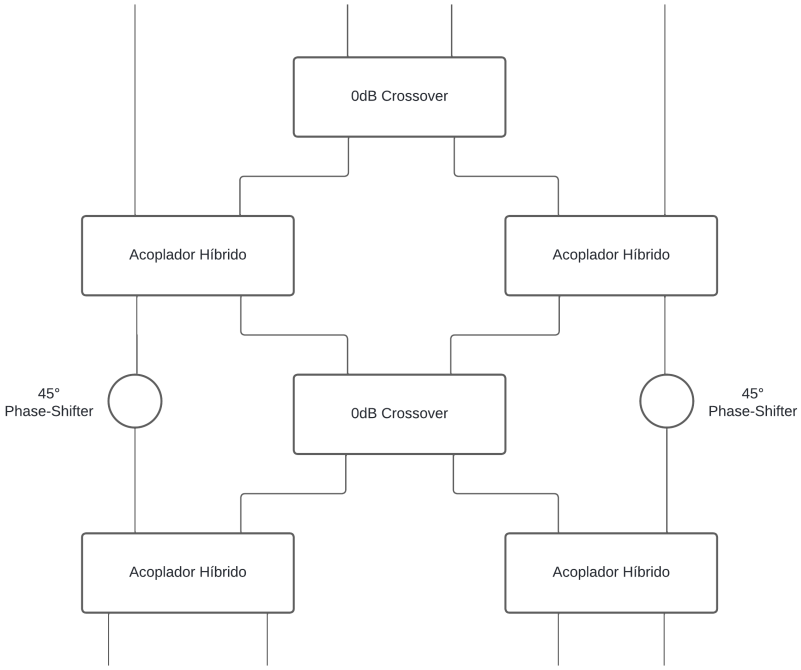
De forma analógica, a formação dos feixes direcionados se dá utilizando defasadores em cada caminho até as antenas. Linhas de atraso analógicas são usadas para introduzir atrasos controlados aos sinais recebidos por cada elemento de antena e ao ajustar os valores de atraso, os sinais podem ser alinhados temporalmente para atingir o direcionamento do feixe (Saeed e Nwajana, 2024).

Há diversas aplicações da formação de feixes. Juntamente com a tecnologia *MIMO*, é uma ferramenta muita utilizada nas comunicações *WLAN*, vista em roteadores *Wi-Fi* em todas as frequências de transmissão ($2,4\ GHz$, $5\ GHz$ e $6\ GHz$).

2.2 Matriz de Butler

A matriz de Butler é uma das possibilidades para a implementação na formação de feixes, dado que em outras arquiteturas, como o arranjo de antenas em fase, é necessário o uso de defasadores variáveis, definindo a defasagem individualmente para cada antena. A implementação de defasadores variáveis de baixo consumo de potência não é trivial (Verona, 2021). Nesse contexto, o uso de uma matriz de Butler apresenta vantagens, pois emprega defasadores fixos, elementos de menor complexidade em termos de implementação.

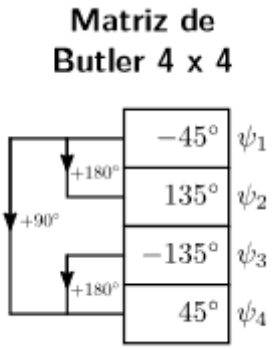
Figura 2.1. Diagrama de Blocos da Matriz de Butler.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sua construção é definida por um número N de entradas e N de saídas, sendo N uma potência de 2. Sendo assim, é necessário para sua construção um número fixo de acopladores híbridos em quadratura e defasadores, seguindo $(\frac{N}{2})(log_2 N - 1)$. Além desses componentes, é necessário o uso de elementos de cruzamento de linhas, devido ao cruzamento de sinais entre os acopladores.

Figura 2.2. Valores de ψ para a matriz 4x4.



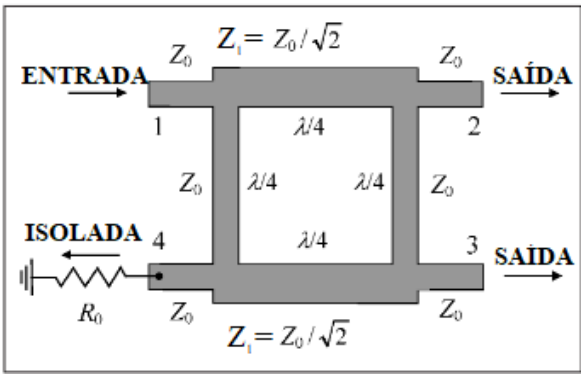
Fonte: (Verona, 2021).

Com a arquitetura da matriz de Butler proposta na Figura 2.1, haverá uma diferença de fase ψ entre as saídas, sendo essa diferença de fase de $\psi = 180°$, como mostra a Figura 2.2. A Matriz de Butler 4×4 será capaz de dividir a potência inserida em uma das entradas igualmente entre as quatro saídas, porém com uma diferença de fase consecutiva de $\psi_1 = -45°$, $\psi_2 = 135°$, $\psi_3 = -135°$ e $\psi_4 = 45°$, dada em função da porta de entrada N utilizada (Verona, 2021).

2.2.1 Acoplador Híbrido em Quadratura

O acoplador híbrido em quadratura é utilizado para dividir a potência de entrada para duas saídas. O acoplador pode distribuir metade da potência (−3 dB) para cada porta de saída e produzir uma diferença de fase de 90°(Jizat *et al.*, 2010).

Figura 2.3. Geometria do acoplador híbrido em quadratura.



Fonte: Adaptada (Pozar, 2012).

Sua construção se dá pelo casamento de duas micro-linhas com impedâncias diferentes, Z_0 e $Z_1 = Z_0/\sqrt{2}$, e comprimento $\lambda_g/4$, como pode ser visto na Figura 2.3. Tendo como matriz de parâmetros S, que de acordo com (Pozar, 2012) fornece uma descrição completa da rede vista em suas N portas, pois relaciona as ondas de tensão incidentes nas portas com as ondas refletidas nas portas. Então a matriz S ideal:

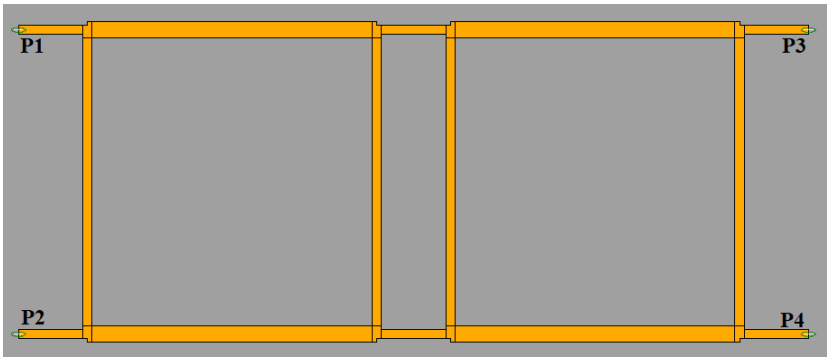
$$\mathbf{S}_{f_0} = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & e^{j90°} & 1 & 0 \\ e^{j90°} & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & e^{j90°} \\ 0 & 1 & e^{j90°} & 0 \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

Sendo f_0 a frequência central.

2.2.2 Cruzamento de linhas

O cruzamento de linhas é feito essencialmente com dois acopladores híbridos em cascata. É utilizado para obter grande isolamento entre as duas portas de inserção de sinal, de modo que não estejam eletricamente conectadas (Rahayu e Simanihuruk, 2021). Como há cruzamentos de linhas entre os acopladores, é preciso que os sinais de entrada não se sobreponham.

Figura 2.4. Geometria do Crossover.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ou seja, o sinal que entrar pela porta 1 será direcionado para a porta 4 e o sinal que entrar pela porta 3 será direcionado para a porta 2, entendido na Figura 2.4.

Em termos dos parâmetros S, temos:

$$\mathbf{S}_{f_0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & e^{j90^\circ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{j90^\circ} \\ e^{j90^\circ} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j90^\circ} & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

2.2.3 Defasador Fixo

O último elemento presente na matriz de Butler é o defasador fixo, elemento necessário para mudar a fase do sinal(Jizat *et al.*, 2010). Para sua construção é necessário adicionar um determinado comprimento à linha de transmissão (Aourik e Errkik, 2021), dado por:

$$\Delta l = \frac{\theta \lambda_g}{360}; \tag{2.3}$$

em que θ é a defasagem desejada e λ_g é o comprimento de onda guiado. O atraso necessário para a configuração da matriz é de $-45°$. Para obter o valor do comprimento de onda guiado é preciso primeiro encontrar o valor da constante dielétrica efetiva, dado que parte dos campos eletromagnéticos da micro-linha se estendem pelo ar, é preciso do valor efetivo na linha de transmissão. Assumindo que W é a largura da micro-linha e h a espessura do substrato:

para $\frac{W}{h} \geq 1$:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2}(1 + 12\frac{h}{W})^{-0,5}; \tag{2.4}$$

sendo $\frac{W}{h} \leq 1$:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2}(1 + 12\frac{h}{W})^{-0,5} + 0,04(1 - \frac{W}{h})^2; \tag{2.5}$$

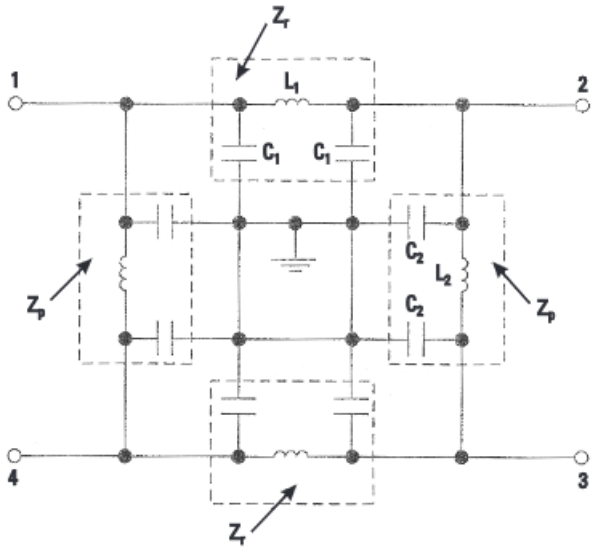
então:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_{reff}}}. \tag{2.6}$$

2.3 Circuito Equivalente LC para o Acoplador Híbrido em Quadratura

Além da construção do acoplador híbrido utilizando as micro-linhas de transmissão, pode ser feita sua construção utilizando um circuito LC, o que reduz o tamanho da placa.

Figura 2.5. Topologia do circuito equivalente para Acoplador Híbrido em quadratura.



Fonte: (Bahl, 2003).

De acordo com (Bahl, 2003), cada linha de transmissão presente na Figura 2.3 é substituído por um equivalente rede-pi, como visto na Figura 2.5. Os valores de cada elemento são obtidos com a matriz de parâmetros ABCD. Para cada linha de transmissão com impedância Z:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & jZsen\theta \\ j\frac{1}{Z}sen\theta & cos\theta \end{bmatrix}; \tag{2.7}$$

para qualquer uma das redes-pi:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\omega^2 LC & j\omega L \\ j\omega C(2-\omega^2 LC) & 1-\omega^2 LC \end{bmatrix}; \tag{2.8}$$

Então, temos que para cada uma das linhas de transmissão mostradas na Figura 2.3:

$$L_1 = \frac{Z_1}{\omega}; \tag{2.9}$$

$$L_2 = \frac{Z_0}{\omega}; \tag{2.10}$$

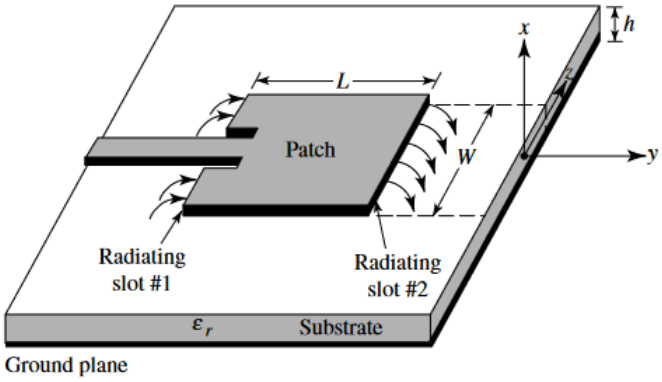
$$C_t = C_1 + C_2 = \frac{1}{\omega}(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_0}). \tag{2.11}$$

Em que ω é a frequência angular.

2.4 Antenas Impressas

As antenas impressas são muito utilizadas em projetos de circuitos impressos visto sua simplicidade e por serem antenas de baixo custo. São projetos muito versáteis em termos de frequência de ressonância, polarização, padrão e impedância (Balanis, 2005). As antenas impressas podem assumir diversos formatos, cada um com suas características, sendo o formato retangular um dos mais utilizados.

Figura 2.6. Geometria das antenas impressas retangulares.



Fonte: (Balanis, 2005).

Para o projeto da antena, é preciso considerar primeiramente os valores da constante dielétrica do substrato utilizado (ϵ_r), da frequência central de operação (f_0) e a espessura do substrato (h) para determinar o comprimento l e a largura W, mostrados na Figura 2.6.

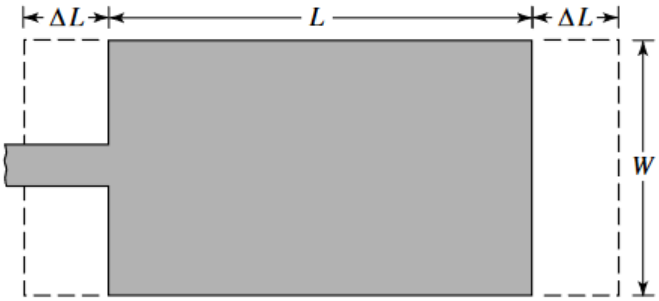
$$W = \frac{c}{2f_0(\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}})}; \tag{2.12}$$

$$l = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta l; \tag{2.13}$$

Sendo Δl uma ação do efeito de campos marginais laterais, que estende eletricamente o comprimento da antenas, pode ser visto na Figura 2.7, dado por:

$$\Delta l = 2 * 0,412h \left(\frac{(\epsilon_{reff} + 0,3)(\frac{W}{h} + 0,264)}{(\epsilon_{reff-0,258})(\frac{W}{h} - 0,8)} \right). \tag{2.14}$$

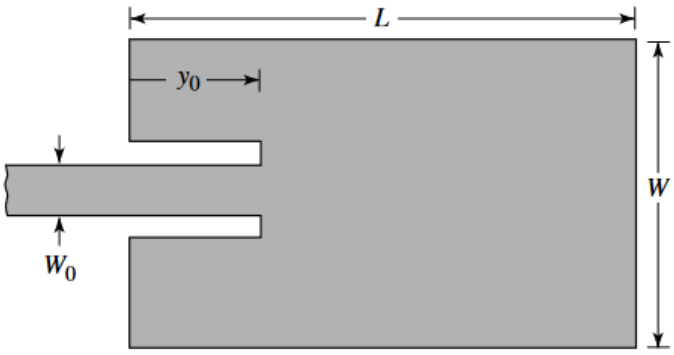
Figura 2.7. Efeito de campos marginais laterais.



Fonte: (Balanis, 2005).

Como a antena pode ser alimentada pela micro-linha, é necessário que seja realizado o casamento de impedâncias. De acordo com (Balanis, 2005), a resistência de entrada pode ser alterada inserindo espaços laterais, recuados a uma distância y_0.

Figura 2.8. Inserção dos espaçamentos.



Fonte: (Balanis, 2005).

Primeiramente, é preciso saber qual é a impedância vista na entrada da antena, para então calcular y_0 para que altere esta impedância vista e case com a impedância da linha de transmissão.

A resistência de entrada, conforme demonstra (Balanis, 2005), pode ser expressa por:

$$R_{in}(y=0) = \frac{1}{2.(G_1 \pm G_{12})}. \tag{2.15}$$

Sendo G_1 a condutância própria e G_{12} a condutância mútua, devido a ação dos dois espaços de radiação, vistos na Figura 2.6. A impedância real à uma distância $y = y_0$ do início da antena é dada por:

$$R_{in}(y=y_0) = R_{in}(y=0)cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right). \tag{2.16}$$

Com o valor da resistência de entrada obtida pela Equação 2.15 e sabendo a impedância da linha de transmissão, pode ser encontrado a distância y_0 pela Equação 2.16.

3 Problema a ser resolvido

3.1 Problema Principal

A principal problemática deste trabalho é projetar uma matriz de Butler operando em 915 MHz, em que seu uso poderá ser aplicado em tecnologias IoT, de forma a melhorar o uso das tecnologias em 915 MHz com eficiência e baixo custo. Como dito por (Ud Din *et al.*, 2018), com o crescimento da Internet, a IoT realizou um efeito impressionante em vários campos e houveram várias aplicações de IoT empregadas para melhorar a operação da rede e a qualidade da experiência dos usuários.

Como a matriz de Butler é projetada para a criação de feixes, este trabalho tem o objetivo de solucionar a criação de um formador de feixes eficiente na faixa de 915 MHz com micro-linhas de transmissão.

3.2 Desafios Técnicos

Os principais desafios técnicos deste trabalho são a eficiência da matriz, em que o sinal tenha as menores perdas possíveis, adequar as defasagens de cada componente a fim de manter o direcionamento dos feixes criados, o tamanho total da placa, pois quanto menor a frequência de operação maior o comprimento de onda, e, por fim, a escolha do conector que melhor se adeque à matriz em termos de complexidade e casamento de impedância.

4 Metodologia

4.1 Projeto dos Componentes da Matriz de Butler

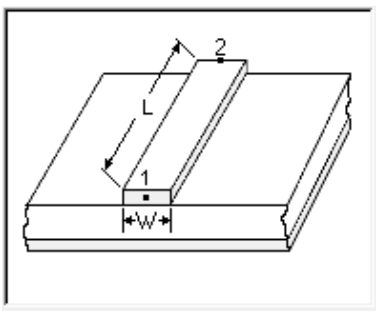
Como primeiro passo, é necessário projetar e simular cada elemento necessário para a construção da matriz de Butler. A simulação foi realizada utilizando o software ADS (*Advanced Desing System*). Neste projeto, foi utilizado o substrato FR4, que apresenta um bom balanceamento entre custo e performance, levando em conta suas propriedades e usos em relação ao valor agregado, com espessura h de $0,8\ mm$ e tangente de perdas $tan\ \delta$ em 2.10^{-2}.

Antes de dar inicio à simulação, é necessário calcular as dimensões das linhas de transmissão, de acordo com as equações abaixo:

$$W = \frac{c}{2f_o\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} \tag{4.1}$$

$$l = \frac{c}{2f_o\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{4.2}$$

Figura 4.1. Parâmetros W e L da linha de transmissão.



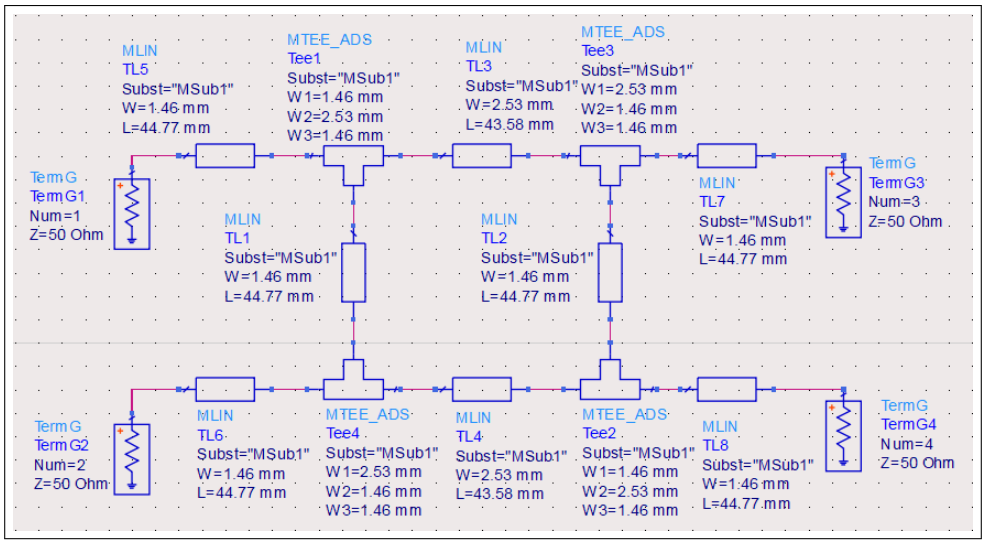
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em que W, L, h, ϵ_r e f_0 são respectivamente a largura da linha, o comprimento, a espessura do substrato, a constante dielétrica e a frequência central desejada. Para o comprimento, é necessário ainda a constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} calculada utilizando a Equação 2.4;

4.1.1 Acoplador Híbrido em Quadratura

O acoplador é o elemento central na construção da matriz de *Butler* (Srivastava e Gupta, 2006). Seguindo o proposto na Figura 2.3, o projeto se deu conforme Figura 2.3.

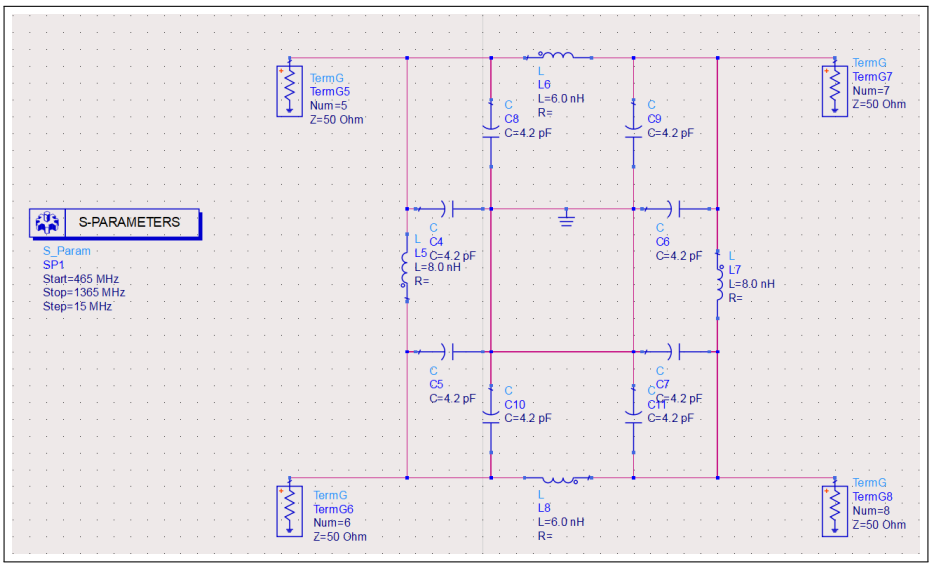
Figura 4.2. Esquemático realizado para o Acoplador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando a ferramenta para o cálculo das micro-linhas disponibilizada no ADS, foram obtidos os valores de largura e espessura com base nas impedâncias mostradas na Figura 2.3, 50 Ω para Z_0 e 35.35 Ω para $Z_1 = Z_0/\sqrt{2}$, ambas em 90°. Para validação da arquitetura, foi simulado com base nos parâmetros S.

Figura 4.3. Circuito LC para o Acoplador.



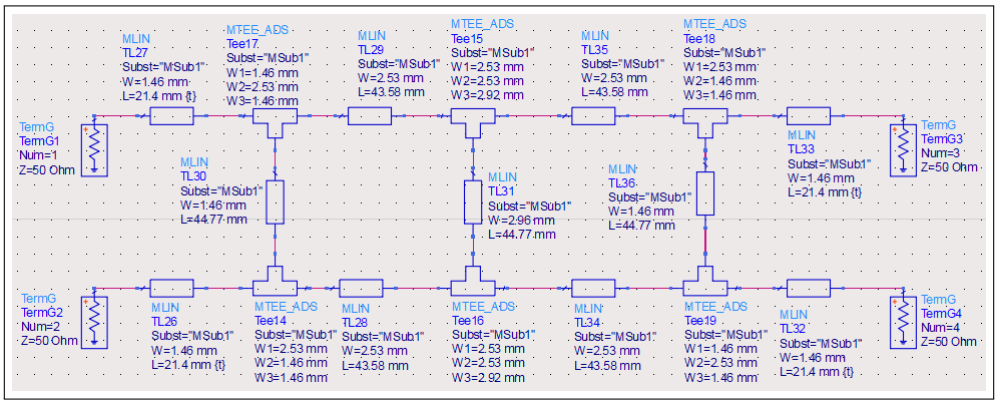
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para comparativo, também foi simulado o acoplador híbrido utilizando um circuito LC, dado o *layout* visto na Figura 2.5. Com as Equações 2.9, 2.10 e 2.11 foram calculados os valores de L_1 de $6,0\ nH$, L_2 de $8,0\ nH$, C_1 de $4,2\ pF$ e C_2 também $4,2\ pF$, visto na Figura 4.3.

4.1.2 Cruzamento das Linhas

Dada a simplicidade de construção do cruzamento das linhas, foram utilizados dois acopladores híbridos cascateados, seguindo os parâmetros de simulação anterior. A junção dos dois acopladores pode ser vista na Figura 4.4.

Figura 4.4. Esquemático realizado para o componente de cruzamento de linhas.



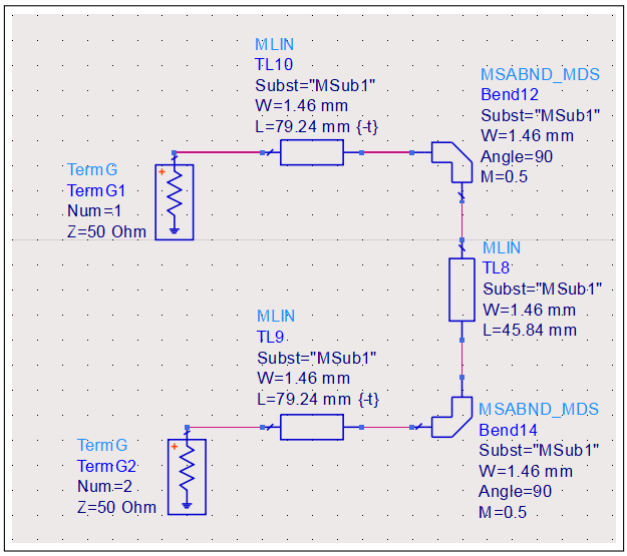
Fonte: Elaborado pelo autor.

Somente com a junção dos acopladores, o componente estava produzindo uma defasagem de $17,8°$. Assim, foi utilizado a ferramenta de *Tunning* de otimização no comprimento das linhas de transmissão mais externas a fim de zerar essa defasagem.

4.1.3 Defasador Fixo

Como um dos elementos centrais da arquitetura da matriz de Butler, sua construção é simples, como visto anteriormente. Com a Equação 1.8, foi calculado o comprimento da linha de transmissão para gerar uma defasagem de $-45°$.

Figura 4.5. Esquemático realizado para o defasador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

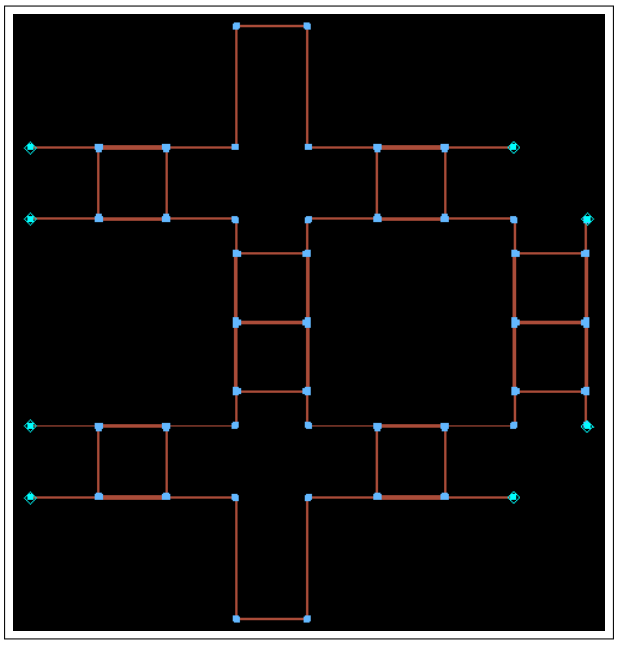
Para otimizar os resultados deste elemento, foi utilizado a ferramenta de *Tunning*, resultando nos valores vistos na Figura 4.5.

4.2 Projeto da Matriz de Butler

4.2.1 Espaçamentos

Com todos os elementos projetados e simulados, foi possível construir a matriz de Butler 4x4 completa. Para isso, primeiramente foi alinhado as saídas de forma que fiquem enfileiradas, adicionado assim um certo comprimento da linha de transmissão, visto na Figura 4.7.

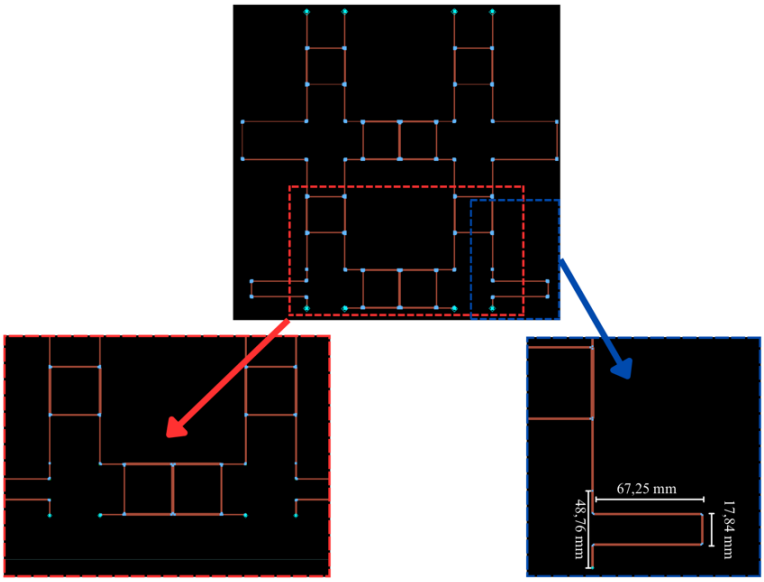
Figura 4.6. Esquemático realizado para a Matriz de Buttler.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para garantir as fases desejadas da matriz, foi posto mais um defasador que compense o atraso causado pela adição das linhas, de $57,40°$.

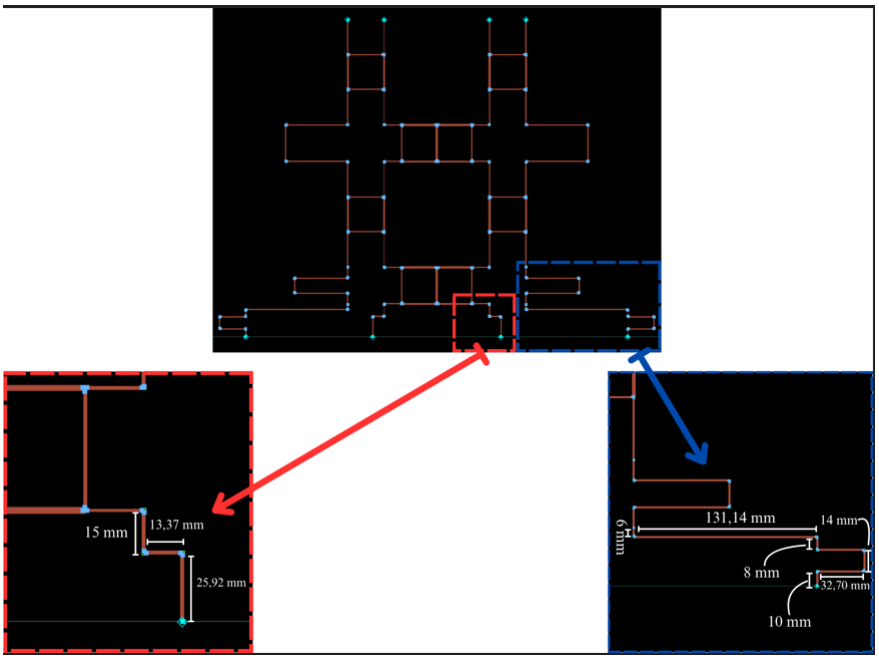
Figura 4.7. Esquemático realizado para a Matriz de Buttler após alinhamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após este passo, foi composto o espaçamento para a colocação das antenas, espaçadas de $\lambda/2$, visto na Figura 4.8. Para manter as defasagens, foi posto mais um defasador de $-158,8°$.

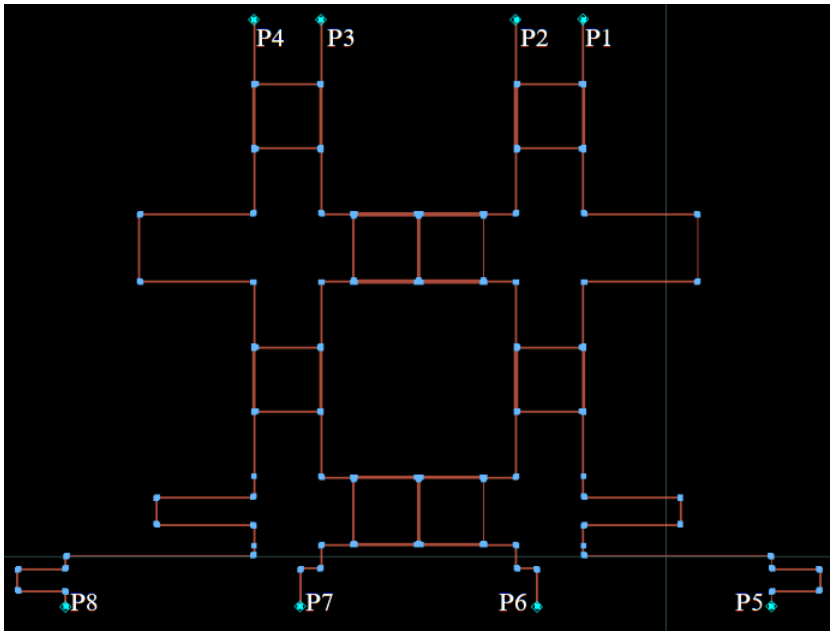
Figura 4.8. Esquemático realizado para a Matriz de Buttler com espaçamento para as antenas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.9 é visto a arquitetura final, em que as portas $P1, P2, P3$ e $P4$ são as entradas e as portas $P5, P6, P7$ e $P8$ são as saídas.

Figura 4.9. Esquemático final realizado para a Matriz de Buttler.

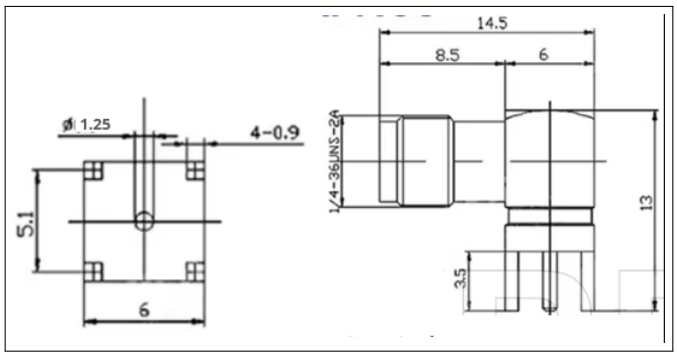


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Modelo de Placa com Conector SMA

A fim de possibilitar a construção da matriz, foi desenhado e simulado um conector SMA e inseridos os devidos furos onde serão fixados na matriz. Foram utilizadas as medidas de referência, na Figura4.10, para a construção do modelo em CAD, visto na Figura 4.11.

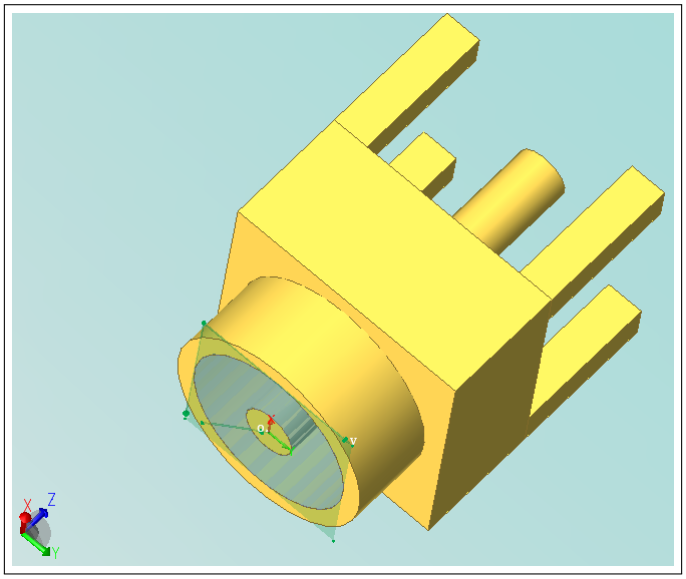
Figura 4.10. Medidas do conector utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

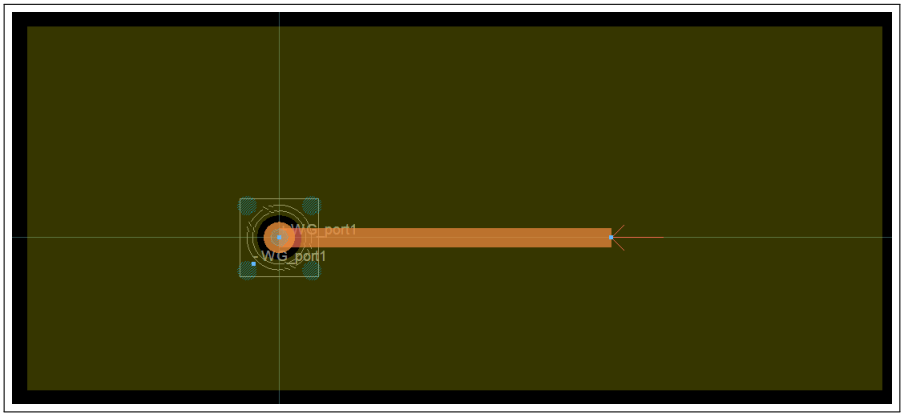
Para verificar a adequação do modelo, foi simulado em FEM a transição do conector com as linhas de transmissão da matriz de Butler, visto na Figura 4.12.

Figura 4.11. CAD do conector modelado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.12. Modelo para simulação da transição.

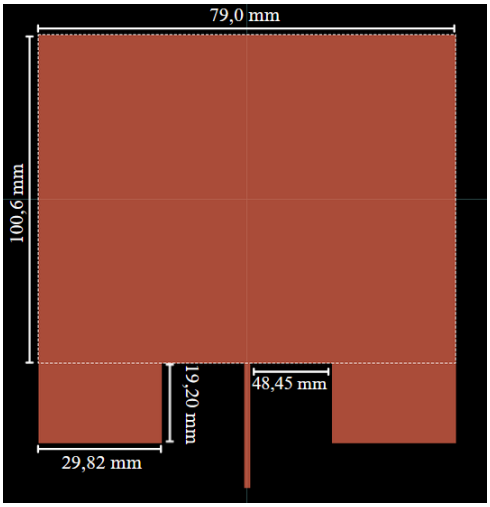


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Modelo de Placa com as Antenas Impressas

Para a rede de antenas impressas, foram obtidos os valores de cada antena pelas equações apresentadas na seção 2.4, observando os princípios do casamento de impedâncias, vistos na Figura 4.13.

Figura 4.13. Valores usados para construção da rede de antenas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

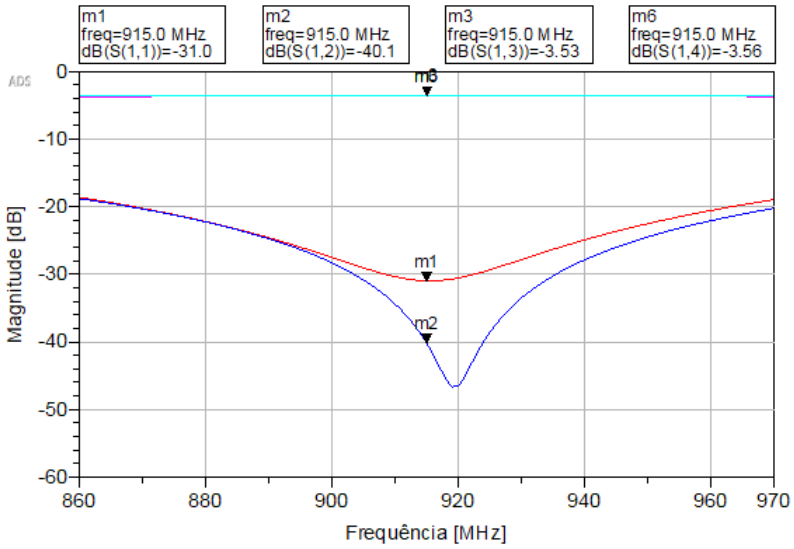
5 Resultados e Discussões

5.1 Avaliação dos Componentes da Matriz de Butler

5.1.1 Acoplador Híbrido em Quadratura

Primeiramente, pode-se observar nas Figuras 5.1 e 5.3 o comportamento do acoplador simulado em linhas com substrato na frequência de interesse. Para as magnitudes simuladas nessa configuração, onde a porta $P1$ é a entrada e as portas $P3$ e $P4$ são a saída, sendo a porta $P2$ isolada, visto na Figura 5.2.

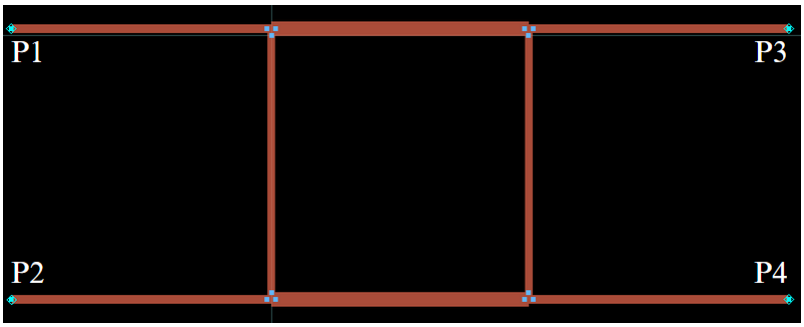
Figura 5.1. Comportamento do acoplador híbrido em parâmetros S



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível visualizar que para as magnitudes S_{13} e S_{14}, associadas à perda de inserção, adotaram valores de $-3,5$ dB em ambas, o que mostra baixo desbalanceamento na divisão de potência dos sinais de entrada.

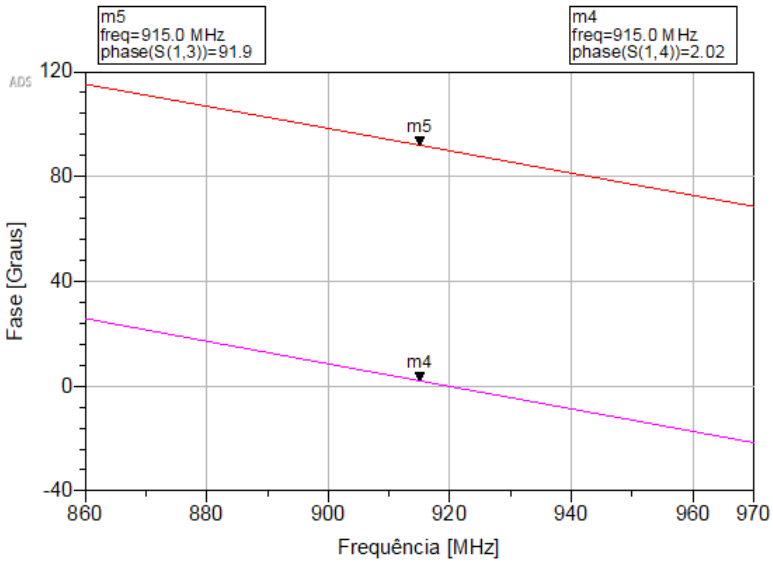
Figura 5.2. PCB Layout do Acoplador Híbrido



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para a magnitude S_{11}, associada à perda de retorno, obteve-se $-31,0$ dB, o que significa que mais do que 99% do sinal está sendo entregue sem reflexão.

Figura 5.3. Diferenças de fase entre as saídas Acoplador Híbrido

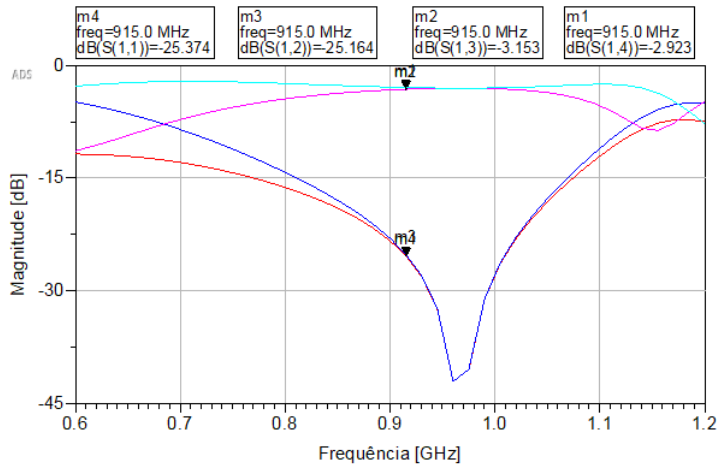


Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das magnitudes, é visto que a diferença de fase entre as portas de saída ($P3$ e $P4$), na Figura 5.3, é de $89,9°$, valor bem próximo do esperado para o acoplador, como visto anteriormente.

5.1.1.1 Circuito Equivalente LC

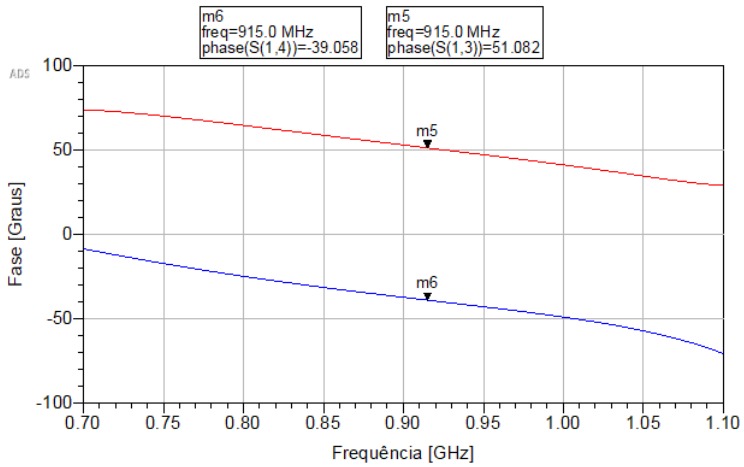
Figura 5.4. Resultados da simulação do circuito LC



Fonte: Elaborado pelo autor.

Agora em relação ao circuito LC, para as perdas de inserção foram observados os valores de $-3,1$ dB e $-2,9$ dB para S_{13} e S_{14}, respectivamente, mostrando que a divisão da potência de entrada está correta. Para a perda de retorno $S_{11} = -25,3$ dB, em que a maior parte dos sinais tem menos de 1% de reflexão. E por fim, para a diferença de fase entre as potências de saída, o valor foi de $90,2°$.

Figura 5.5. Resultados das fases de saída da simulação do circuito LC



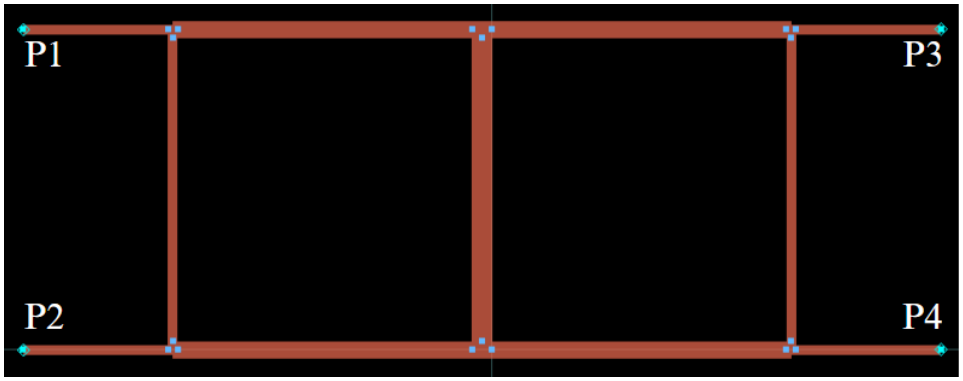
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, é observado que o comportamento do circuito equivalente LC para o acoplador híbrido é bastante similar ao modelo utilizando as micro-linhas de transmissão. Essa constatação pode ser útil em termos de custo e espaço, visto que o tamanho dos componentes LC e valor são menores se comparados com o modelo de micro-linhas.

5.1.2 Cruzamento das linhas

Como visto, é necessário que o modelo utilizado para que o cruzamento de linhas tenha bom isolamento entre as portas de entrada, a fim de impedir a sobreposição. Sendo as portas $P1$ e $P3$ como entradas e $P2$ e $P4$ como saídas, na Figura 5.6.

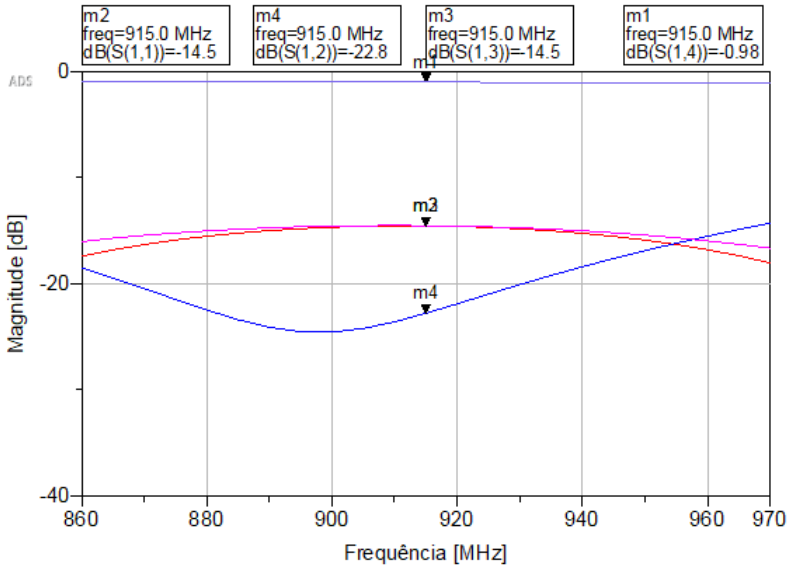
Figura 5.6. PCB Layout do Crossover



Fonte: Elaborado pelo autor.

É observado que o valor de S_{14} é de $-0,9$ dB, bem próximo à 0 dB, o que indica mínima perda do sinal pelo componente. Para as perdas por retorno (S_{11} e S_{33}), apresentaram valores de $-14,5$ dB, o que significa certa parte do sinal é refletida.

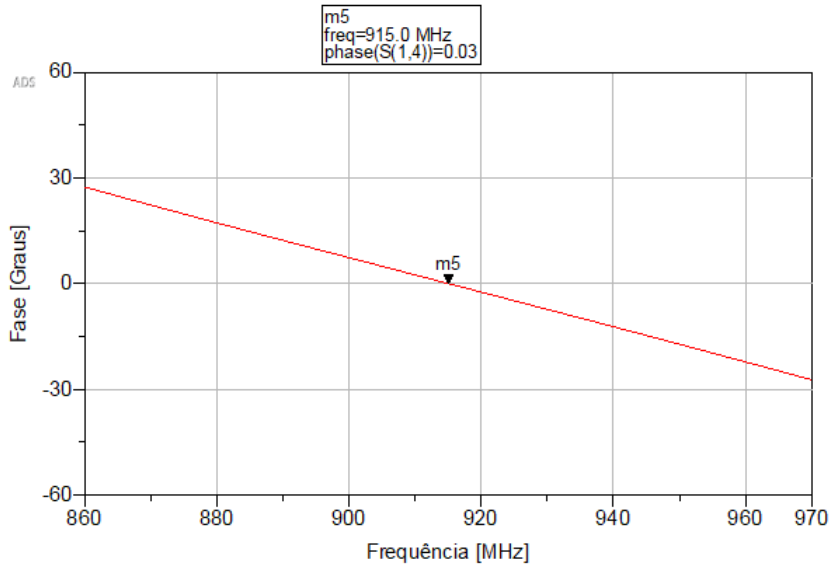
Figura 5.7. Resultados da simulação do cruzamento de linhas em parâmetros S.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como foi utilizado a ferramenta de otimização, é visto que não há defasagem entre o sinal de entrada e o sinal que sai do componente, validando o uso da otimização das micro-linhas de transmissão.

Figura 5.8. Resultado da defasagem após otimização.



Fonte: Elaborado pelo autor.

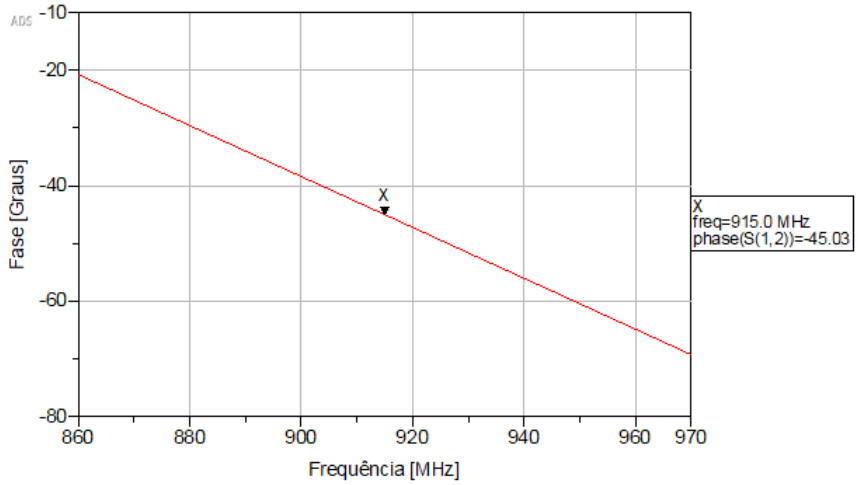
5.1.3 Defasador



Figura 5.9. PCB Layout do Phase-Shifter

Para o último elemento, é desejável visualizar o atraso entre o sinal que entra e o que sai de $-45°$. Portanto, é visto na Figura 5.10 o resultado da simulação em graus, do parâmetro referente ao sinal.

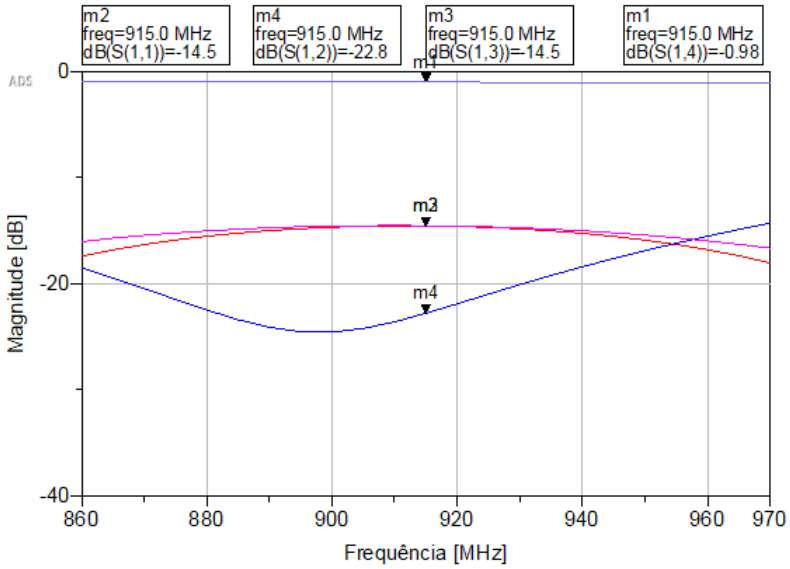
Figura 5.10. Resultado da defasagem do componente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor obtido foi de $-45,0°$ que mostra ótima aproximação obtida pela ferramenta utilizada de otimização no software. É mostrado também o valor referente à perda de inserção (S_{12}) de $-0,5$ dB, que por se tratar de apenas um comprimento de linha, não causa grandes perdas de sinal.

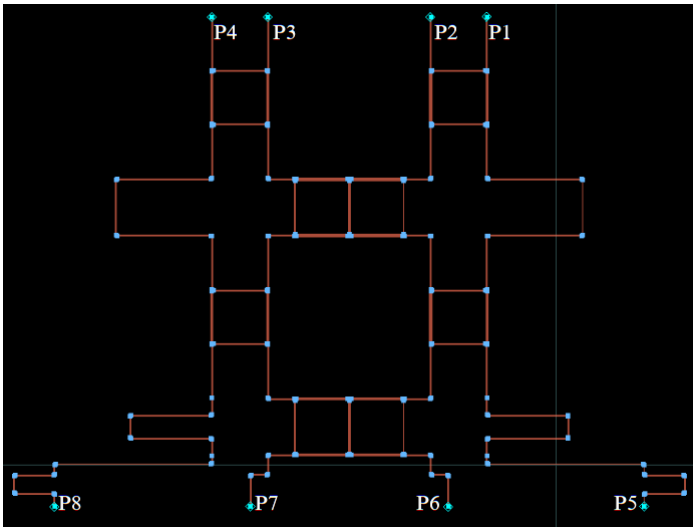
Figura 5.11. Resultados das perdas no defasador fixo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Avaliação da Matriz de Butler

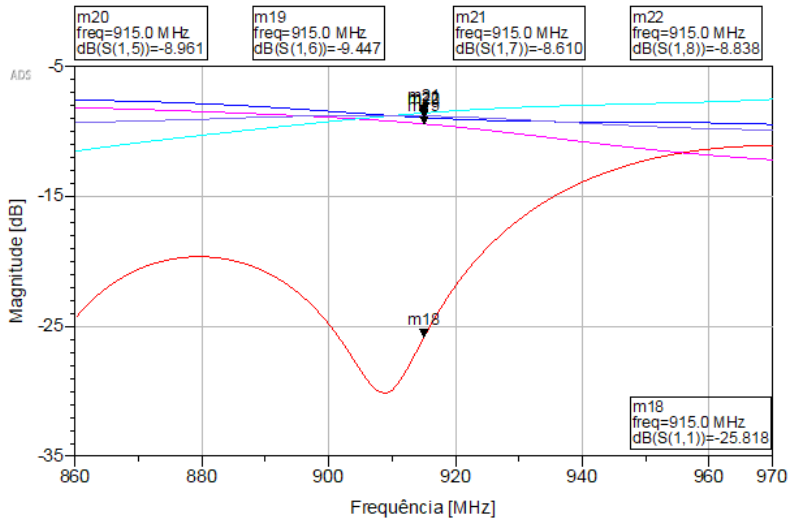
Figura 5.12. PCD completa da Matriz de Butler.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a validação do comportamento dos componentes, foi possível combiná-los para a averiguar o comportamento da arquitetura da matriz de Butler, com a simulação com linhas com substrato.

Figura 5.13. Resultados da Simulação da Matriz de Butler.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 5.13 e da Tabela 5.1 é visto o comportamento da matriz com os valores das perdas de inserção. Foi observado que para a simulação com linhas de transmissão com substrato obteve-se valores de perdas de inserção homogêneos, o que demonstra que o projeto proposto realiza a divisão de potência entre as quatro portas de saída.

Tabela 5.1. Perdas de Inserção em dB para cada porta de saída referente as portas de entrada..

Perdas de Inserção [dB]				
n	S_{5n}	S_{6n}	S_{7n}	S_{8n}
1	$-8,9$	$-9,4$	$-8,6$	$-8,8$
2	$-8,9$	$-8,3$	$-8,3$	$-9,0$
3	$-9,0$	$-8,3$	$-8,3$	$-8,9$
4	$-8,8$	$-8,6$	$-9,4$	$-8,9$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5.2, mostra as perdas de retorno nas portas de entrada, com valores superiores a $-19,0$ dB, mostrando bom casamento de impedância da matriz e que menos de 1% dos sinais incidentes refletem nas portas de entrada.

Tabela 5.2. Perdas de retorno em dB.

Perdas de retorno [dB]	
S_{11}	$-25,8$
S_{22}	$-19,3$
S_{33}	$-19,3$
S_{44}	$-25,8$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação ao esquema das fases das portas de saída, Tabela 5.3, as fases acompanharam bem o que é esperado da matriz de Butler teórica, visto na seção 2.2, com erro máximo de $7,9°$, demonstrando que a arquitetura e métodos utilizados são adequados para obter os resultados esperados para a formação dos feixes.

Tabela 5.3. Diferenças de fase ψ nas portas de saída da matriz.

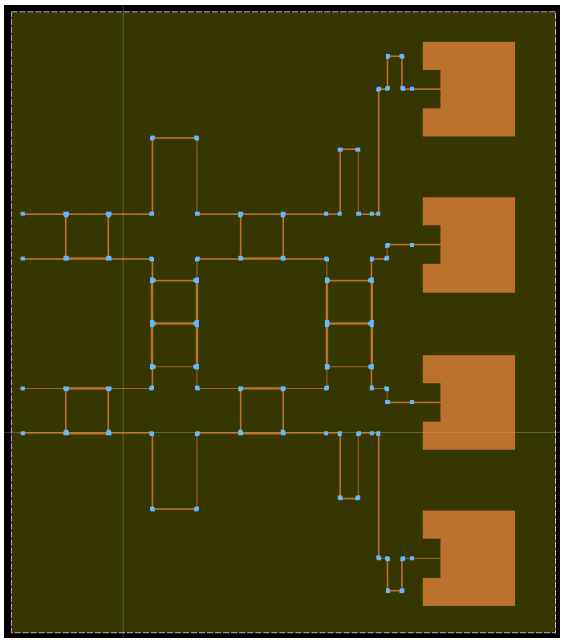
Diferenças de fase ψ.				
n	ψ ideal	$\measuredangle S_{6n} - \measuredangle S_{5n}$	$\measuredangle S_{7n} - \measuredangle S_{6n}$	$\measuredangle S_{8n} - \measuredangle S_{7n}$
1	$-45°$	$-49,7°$	$-52,9°$	$-37,2°$
2	$135°$	$136,6°$	$140,8°$	$132,4°$
3	$-135°$	$-132,4°$	$-140,8°$	$-136,6°$
4	$45°$	$37,2°$	$52,9°$	$49,7°$

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Integração com Rede de Antenas e Conectores SMA

Integrando as antenas impressas na matriz de Butler, obteve-se o arranjo final da matriz, visto na Figura 5.14.

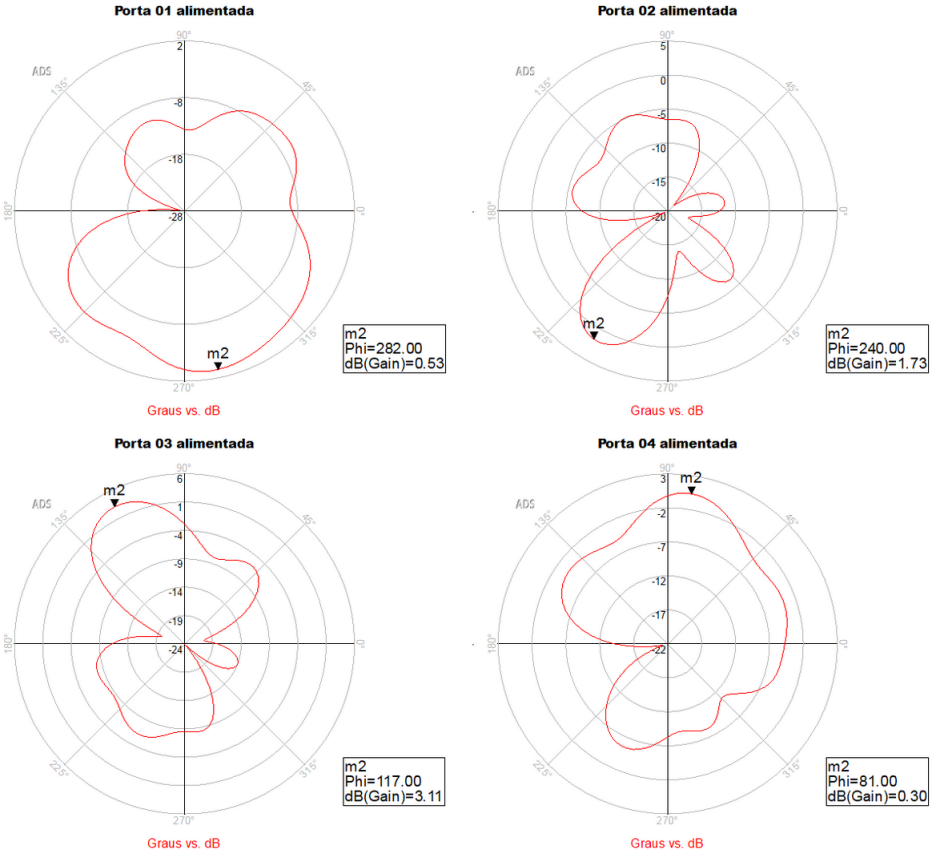
Figura 5.14. Arranjo final da matriz de Butler com a rede de antenas impressas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com esse arranjo final, foram obtidos os padrões de radiação vistos na Figura 5.15.

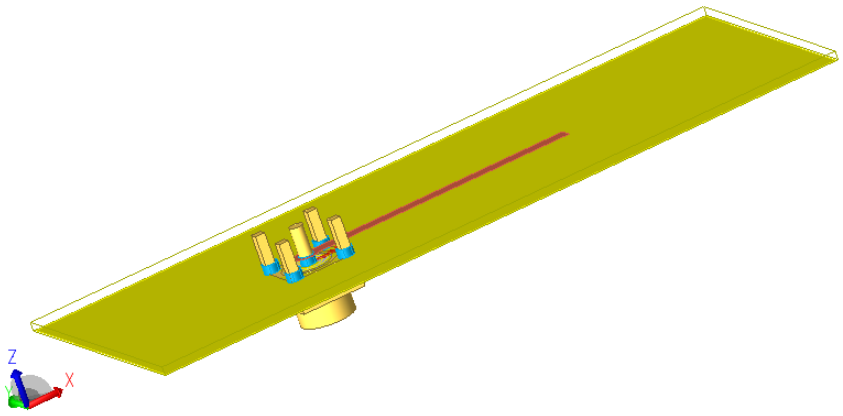
Figura 5.15. Diagramas normalizados de radiação dos ganhos simulados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 5.15 é visto que, quando as portas 1, 2, 3 e 4 são ativadas as direções dos feixes são $-75°$, $-120°$, $117°$ e $81°$, respectivamente, mostrando a capacidade de projetar e direcionar os feixes de acordo com a porta de excitação, o que se esperava do projeto da matriz de Butler.

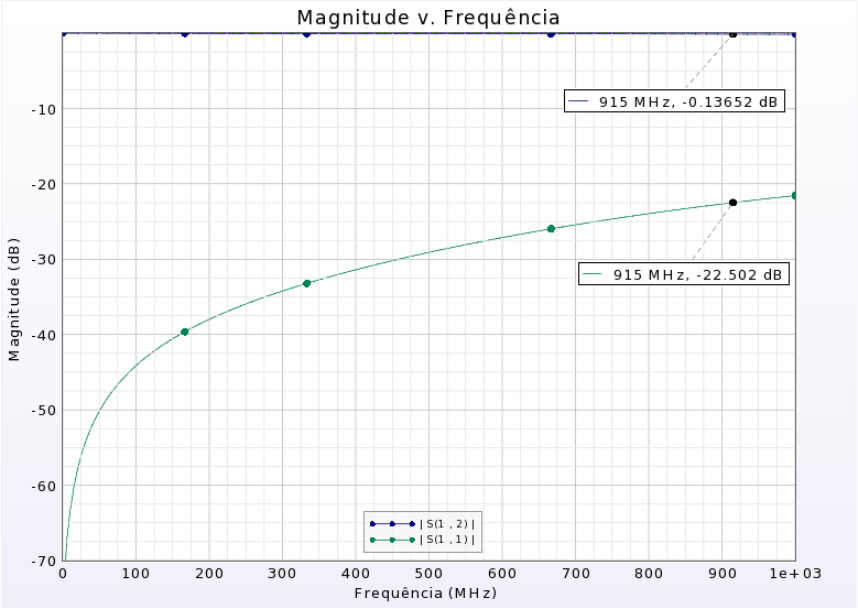
Figura 5.16. Vista da transição simulada com o conector.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5.16 é visto o esquema utilizado para simular a transição da micro-linha de transmissão para o conector SMA. Após a simulação FEM, foi visto que apresentou valores de perda de inserção (S_{12}) e perda de retorno (S_{11}) em $-0,1$ dB e $-22,5$ dB.

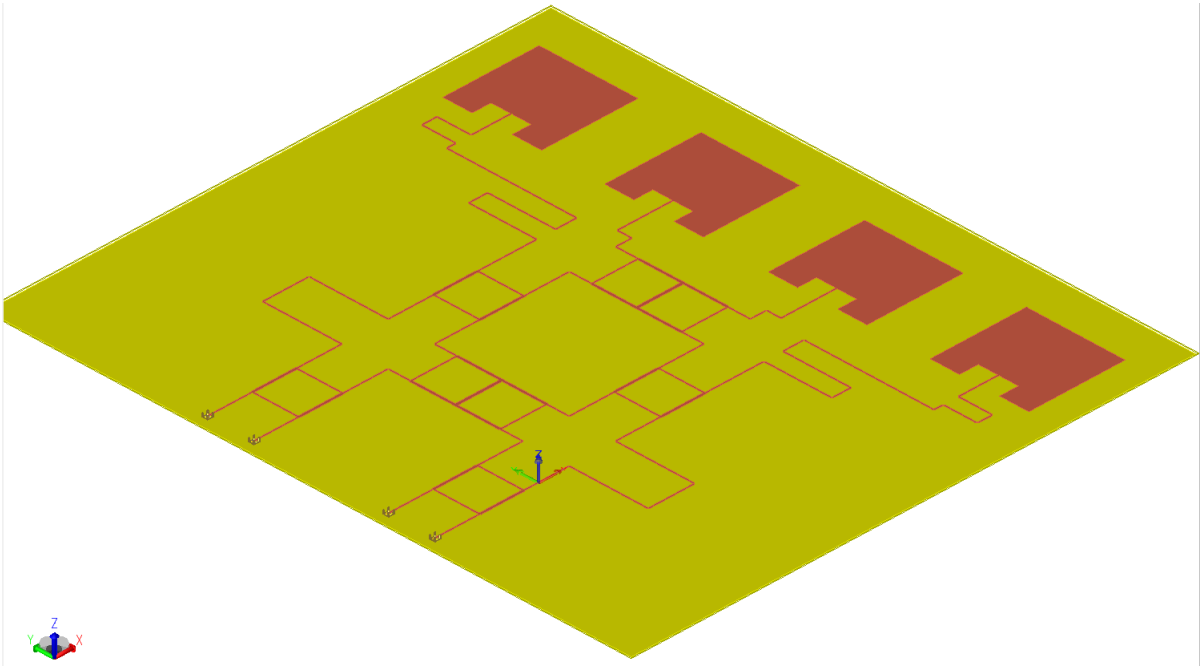
Figura 5.17. Perdas na transição com o conector



PCB Layout do Phase-Shifter

Além disso, foi visto que o conector apresentou impedância de $48,9$ ohms, seguindo a impedância prevista para todo o modelo da matriz. Com essas informações referentes ao modelo proposto pro conector SMA, foi possível integrar a matriz.

Figura 5.18. Projeto final da matriz de Butler com a rede de antenas impressas e conectorizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após as simulações apresentadas, o resultado final do projeto é visto na Figura 5.18, com todos os elementos da matriz, a rede de antenas impressas e os conectores SMA escolhidos, possuindo um tamanho final de placa de $57,9$ x $65,8$ cm.

6 Conclusão e Futuros Trabalhos

Este trabalho teve por objetivo projetar e simular uma Matriz de Butler para operar em $915MHz$ em um substrato FR4, a fim de servir como uma alternativa para as comunicações em redes sem fio.

A pesquisa e entendimento acerca da arquitetura, assim como de todos os elementos necessários, foi de extrema necessidade para a construção dos modelos de simulação. Ainda assim, o uso das ferramentas dispostas no software utilizado auxiliaram na obtenção de bons resultados. Desse modo, o projeto dos acopladores alcançou resultados satisfatórios na frequência de operação, expondo boa isolação e baixas perdas de retorno, além de apresentarem sinais de saída em quadratura.

No projeto do cruzamento de linhas que utilizam dois acopladores em cascata, de início não foram encontrados resultados excelentes, visto que há uma defasagem dos sinais. Foi feito então uma otimização no software que zerou a defasagem. Já a implementação do defasador fixo da matriz de Butler, saiu como esperado, apresentando o resultado necessário para a defasagem, sem apresentar perdas no caminho. Em seguida, os dados obtidos com a matriz de Butler completa foram satisfatórios, em termos de divisão de potências de entrada e perdas de retorno, além do principal que é a divisão dos feixes, com pequenos erros em relação do valor ideal.

Com a simulação da matriz de Butler com a rede de antenas impressas, foi visto o direcionamento e formação dos feixes nas direções mostradas, nos ângulo de $-75°$, $-120°$, $117°$ e $81°$.

Por fim, pode-se concluir que a metodologia empregada na construção de todos os elementos necessários foi assertiva, obtendo resultados condizentes em termos de perdas e radiação esperadas na formação dos feixes direcionados. Além de que, de acordo com o referência teórico obtido, foi entendido que o projeto da Matriz de Butler poder ser expandido, em número de portas e feixes direcionados se assim for necessário, de acordo com a aplicação e necessidade.

Em relação ao principais desafios técnicos, foram obtidos resultados que garantem o cumprimento de baixas perdas, defasagens próximas do referencial teórico e escolha do conector, mas ficou a desejar em relação ao tamanho total da placa.

Para um futuro trabalho, é preciso otimizar os tamanhos dos componentes individualmente, de forma a obter resultados iguais ou similares aos obtidos neste trabalho, utilizando técnicas construtivas mais eficazes. Assim, será possível fabricar a matriz como um todo, utilizando as antenas impressas otimizadas, ou com os mesmos conectores já projetados para integração com outro modelo de antena. Assim, será capaz de caracterizar e validar o projeto exposto neste trabalho.

Referências Bibliográficas

Aourik, S. e Errkik, A. (2021). A new design and implementation of 4x4 butler matrix for ka band application. *2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*.

Bahl, I. (2003). *Lumped elements for RF and microwave circuits*. ARTECH HOUSE, INC., 685 Canton Street, Norwood, MA.

Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory*. John Wiley & Sons, Inc.

Banafa, M. (2018). Design and simulation of regtangular microstrip antenna array with 4x4 beam forming network (bnf) using butler matrix.

Cao, Y. e Chin, K.-s. (2017). A compact 38 ghz multibeam antenna array with multifolded butler matrix for 5g applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*.

Elayan, H., Amin, O., Shihada, B., Shubair, R., e Alouini, M.-S. (2019). Terahertz band: The last piece of rf spectrum puzzle for communication systems. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, PP:1–1.

Gerhard P., F. (2014). The tactile internet - applications & challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*.

Jizat, N., abdul rahim, S., Abd Rahman, T., T.K.Geok, e Reza, A. W. (2010). A novel design of butler matrix using optimised size of branch-line couple. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*.

Kumar, S. (2019). A bandwidth enhanced 915 mhz antenna for iot wrist-watch applications.

Pozar, D. (2012). *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.

Priyadarshan, N. V. e Thenmozhi, A. (2017). Beam forming network using 4×4 narrowband butler matrix for tracking and localization applications. *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*.

Rahayu, Y. e Simanihuruk, J. R. M. (2021). Design of 4x4 butler matrix for beamforming 5g antenna. *2021 3rd International Conference on Research and Academic Community Services (ICRACOS)*.

Saeed, M. e Nwajana, A. (2024). A review of beamforming microstrip patch antenna array for future 5g/6g networks. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 9.

Srivastava, G. e Gupta, V. (2006). *Microwave devices and circuit desing*. Prentice-Hall of India, Nova Delhi.

Stevanovic, Ivica e Mosig, J. (2003). Smart antenna systems for mobile communications. *Escola Politécnica Federal de Lausanne*.

Sujay Vailshery, L. (2024). Number of internet of things (iot) connected devices worldwide from 2019 to 2033, by vertical. *statista.com*.

Tiong Desmond, N. C. (2001). Smart antennas for wireless applications and switched beamforming. *Department of Information Technology and Electrical Engineering the University of Queensland*.

Ud Din, I., Guizani, M., Hassan, S., Kim, B.-S., Khan, K., Atiquzzaman, M., e Ahmed, S. H. (2018). The internet of things: A review of enabled technologies and future challenges. *IEEE Access*, PP:1–1.

Van Veen, Barry & Buckley, K. (2009). Beamforming techniques for spatial filtering.

Verona, B. M. (2021). Matriz de butler em interposer mnm para aplicações em ondas milimétricas. *Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos*.

Zhu, H. e Sun, H. (2019). Wideband dual-polarized multiple beam-forming antenna arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*.