UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA PPGEET - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

VITOR LUIZ GOMES MOTA

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE ANTENAS MINIATURIZADAS APLICADAS AO RFID E 5G

> NITERÓI - RJ 2019

VITOR LUIZ GOMES MOTA

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE ANTENAS MINIATURIZADAS APLICADAS AO RFID E 5G

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Comunicações.

Orientadora: Prof^a. Dra. VANESSA PRZYBYLSKI RIBEIRO MAGRI SOUZA Co-orientador: Prof. Dr. TADEU NAGASHIMA FERREIRA

> Niterói - RJ 2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE Gerada com informações fornecidas pelo autor

M917d Mota, Vitor Luiz Gomes DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE ANTENAS MINIATURIZADAS APLICADAS AO RFID E 5G / Vitor Luiz Gomes Mota ; Vanessa Przybylski Ribeiro Magri Souza, orientadora ; Tadeu Nagashima Ferreira, coorientador. Niterói, 2019. 139 f. : 11. Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2019.m.14729708709 1. Antenas Microstrip. 2. Conjuntos de Antenas. 3. RFID. 4. 5G. S. Produção intelectual. I. Souza, Vanessa Przybylski Ribeiro Magri, orientadora. II. Ferreira, Tadeu Nagashima, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título. CDD -

Bibliotecária responsável: Fabiana Menezes Santos da Silva - CRB7/5274

VITOR LUIZ GOMES MOTA

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE ANTENAS MINIATURIZADAS APLICADAS AO RFID E 5G

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Comunicações.

Aprovada em 16 de agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri Souza - Orientadora - UFF

Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira - Co-orientador - UFF

Prof^a. Dra. Leni Joaquim de Matos - UFF

Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos - UFF

Prof Dr. Maurício Weber Benjó da Silva - UFF

Dr. Carlos Vinicio Rodríguez Ron - Inmetro

Niterói - RJ - 2019

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia" (Robert Collier)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e por seu amor, cuidado, bondade e fidelidade tão notórios todos os dias da minha vida e por me conceder mais esta benção de poder realizar e concluir este curso.

Aos meus pais, Luiz Antônio e Angelita, pelos ensinamentos, amor e todos os sacrifícios feitos para me ajudar a chegar até aqui; cada conquista sempre será por mim e por vocês. À minha irmã Bruna por todo incentivo, motivação e parceria de sempre. Aos meus sobrinhos, Luis Filipe e Daniella Vitória, pelos sorrisos sinceros, abraços carinhosos e as bagunças de todos os dias.

À Capes, pela bolsa de estudos durante a relaização do curso e ao Instituto de Pesquisa da Marinha (IPqM) pela possibilidade de utilização da câmara anecóica.

Aos professores do curso, por cada ensinamento transmitido. Em especial, aos professores do LAPROP, Leni, Pedro, Maurício pelo incentivo e ajuda em diversos momentos. Aos membros da banca examinadora, pelos conselhos que, certamente, engrandecerão esse trabalho.

À minha orientadora, Vanessa, pela orientação, paciência, motivação, ajuda em momentos de dificulades, apoio no desenvolvimento deste trabalho, e por sempre acreditar no meu potencial.

Ao meu co-orientador, Tadeu, pelo grande apoio durante todo o curso e auxílio em todas as etapas no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos da igreja por cada oração e palavras de ajuda. Aos amigos que me acompanham desde o Ensino Médio, especialmente Berenice e Jéssica Avelino pela amizade e incentivo desde 2008. Ao grupo de engenheiros, *Satelight*, pelo companheirismo e amizade. Às amigas e engenheiras Nathalia, Fátima e Lillian, pelo encorajamento e pelas palavras de incentivo em diversos momentos dessa jornada.

Aos amigos feitos durante o curso, por toda ajuda, sobretudo a amiga Luciana Briggs pelo incentivo e apoio na montagem do *setup* de medição utilizados neste trabalho. E, também a todos amigos pela compreensão e incentivo durante essa jornada.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Muito Obrigado!

RESUMO

Esta dissertação aborda a o desenvolvimento e a fabricação de conjuntos de antenas de elementos iguais ou distintos no substrato FR-4 para operação nos sistemas RFID (Identificação por rádio frequência), na portadora de 2,4 GHz, e no 5G (Sistema móvel de quinta geração), nas portadoras de 3,5 GHz e 4,8 GHz. Esses *arrays* são utilizados para caracterização experimental, através da medição de seus diagramas de irradiação.

Parra a caracterização do diagrama de irradiação um método alternativo de medição de antenas miniaturizadas é proposto. Para tal, é desenvolvido uma base giratória para as antenas, definida como um protótipo de medicao e caracterização de antenas, que utiliza o *software* Arduino, e possibilita a rotação da antena, de 0° a 360°, através da utilização de um motor de passo. Um par de antenas iguais é utilizado, onde a antena transmissora com a base giratória é conectorizada ao gerador de sinal e a receptora, parada na posição 0°, é conectorizada ao analisador de espectro, ambos conectados ao computador via interface GPIB. Outros dois *softwares* são utilizado, de forma a plotar o diagrama de irradiação.

Os resultados obtidos no *setup* de medição do ambiente real foram comparados tanto com os da simulação quanto com os da câmara anecóica e, assim, validados.

Palavras-chave: Antena, conjuntos, Arduino, RFID, 5G.

ABSTRACT

This dissertation assesses the work and development of antennas and arrays with equal and different patches are developed in FR-4 substrate. They are designed to operate in 2.4GHz, which is the frequency used by RFID systems in Brazil, and in 3.5 GHz and 4.8GHz, which are the candidates frequencies to fifth generation mobile applications, 5G, around the world.

An alternative method to obtain radiation pattern from millimeter waves antennas and antennas arrays is proposed. This method uses a rotatory prototype developed an Arduino with a stepper motor, that allows 0° until 360° rotation. A pair of the same antenna are used, the transmitter antenna is connected to generator signal vector and the receiver antenna is connected to a spectrum analyzer, both of them connected to the computher using GPIB interface. Labview and Matlab are used to control the equipments and collect power reception to plot the radiation pattern in rectangular and polar forms.

Results on a real environment are compared with simulated and anechoic chamber results.

Keywords: antenna, array, Arduino, RFID, 5G.

SUMÁRIO

- · · I	0 1: Introdução	1
1.1.	Justificativa	1
Capítul	o 2: Projeto, Simulação e Fabricação de Antenas Impressas para Ri	FID e 5G6
2.1.	Introdução	6
2.2.	Antenas de Microfita	8
2	2.2.1. Definição do Patch	9
2	2.2.2. Definição do Substrato	10
2	2.2.3. Técnicas de Alimentação	11
2	2.2.4. Tipos de Antenas de Microfita	13
2.3.	Parâmetros de desempenho das antenas	13
2	2.3.1. Polarização	13
2	2.3.2. Diagrama de Irradiação	14
2	2.3.3. Lóbulos e largura de feixe de meia potência e largura entre nulos	15
2	2.3.4. Relação Frente-Costas	16
2	2.3.5. Perda de Retorno	16
2	2.3.6. Diretividade, Ganho e Eficiência	17
2	2.3.7. Largura de Banda	
2.4.	Projeto de Antena com <i>Patch</i> Retangular	
2.5.	Projeto de Antena com <i>Patch</i> Elíptico	24
2.6.	Projeto de <i>Array</i> de antenas com dois elementos	28
2.7.	Projeto de <i>Array</i> de antenas com quatro elementos	34
2.8.	Processo de Fabricação dos <i>Arrays</i> projetados	

Capítulo	o 3: Desenvolvimento do protótipo de medição usando Arduino	41
3.1.	Introdução	41
3.2.	Motor de Passo	41
3.3. circui	Controlando Motor de Passo e outros dispositivos com Arduino: Desenvolv to elétrico	r <mark>imento do</mark>

3.4. progi	Controlando Motor de Passo e outros dispositivos com Arduino: Desenvo ramação	olvimento da 48
3.5.	Construção do protótipo final	51
Capítul	o 4: Automatização dos equipamentos	53
4.1.	Introdução	53
4.2.	Gerador Vetorial de Sinal e conexão com LabVIEW	55
4.3.	Analisador de Sinal e conexão com LabVIEW	57
4.4.	Criação do programa Calibração no LabVIEW	59
4.5.	Criação do programa Sistema de medição automático no LabVIEW	61
4.6.	Plotagem do Diagrama de Irradiação	63
Capítul	o 5: Resultados: Protótipo de <i>Arrays</i> de 2 e 4 elementos	65
5.1.	Introdução	65
5.2.	Análise da Perda de Retorno	65
5.3.	Sistema de Medição	68
5.4.	Resultados de Diagrama de Irradiação	71
5.5.	Resultados de Diagrama de Irradiação: Câmara Anecóica	88
5.6.	Cálculo do Ganho	90
Capítul	o 6: Conclusão	96
6.1.	Análise dos Resultados	96
6.2.	Trabalhos Futuros	98
Referên	icias	99
Anexo A	A: Algoritmo para plotagem da perda de retorno para <i>patch</i> retangul	ar 105
Anexo l	B: Algoritmo para plotagem da perda de retorno para <i>patch</i> elíptico	106
Anexo	C: Algoritmo para plotagem da perda de retorno para <i>array</i> com 2 el	ementos. 107
Anexo l	D: Algoritmo para plotagem da perda de retorno para <i>array</i> com 4 el	ementos108

Anexo E: Algoritmo para controle do motor de passo via Arduino	109
Anexo F: Algoritmo para controle do módulo I/R via Arduino	110
Anexo G: Algoritmo para controle do display LCD via Arduino	111
Anexo H: Algoritmo para controle do display LCD via Arduino	112
Anexo I: Algoritmo para plotagem do diagrama de irradiação	114
Anexo J: Algoritmo para plotagem da perda de retorno dos <i>arrays</i> fabricado	s 119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação de um sistema de comunicação genérico [1]
Figura 1.2. Representação de um sistema de <i>small cells</i> para sistemas de comunicação 5G2
Figura 1. 3. Representação de um sistema de RFID
Figura 1.4. Diagrama esquemático de um campo de provas para medição de diagrama de
irradição de antenas
Figura 2.1. Projeto de antena de microfita (a) vista superior (b) vista lateral ([48])9
Figura.2.2. Exemplos de formas geométricas assumidas pelo patch [49]9
Figura 2.3 Exemplos de técnicas de alimentação direta: (a) via cabo coaxial (b) via linha de transmissão ([50])
Figura 2.4. Exemplos de técnicas de alimentação indireta: (a) acoplamento por proximidade (b) acoplamento por abertura ([50])
Figura 2.5 Exemplos de polarização das ondas eletromagnéticas [48]
Figura 2.6. Representação do diagrama de irradiação da antena nas formas: (a) tridimensional
(b) bidimensional nolar e (c) bidimensional retangular [46]
Figura 2.7 Representação dos conceitos de lóbulo principal secundário HPBW e FNBW no
diagrama de irradiação [51]
Figura 2.8. Criação do modelo <i>patch</i> retangular com elemento casador para portadora de 3.4
GHz no ADK
Figura 2.9. Criação do modelo <i>patch</i> retangular sem elemento casador para portadora de 3.4
GHz no ADK
Figura 2.10. <i>Layout</i> dos modelos de antena simples de <i>patch</i> retangular criados, sendo: (a) 3,4
GHz com elemento casador; (b) 4,8 GHz com elemento casador; (c) 3,4 GHz sem
elemento casador
Figura 2.11. Perda de Retorno simulado para os modelos retangulares: () 3,4 GHz com
elemento casador; $(-)$ 4,8 GHz com elemento casador; $(-)$ 3,4 GHz sem elemento
casador
Figura 2.12. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado em (
para: (a) 3,4 GHz com casador; (b) 4,8 GHz com casador; (c) 3,4 GHz sem casador24
Figura 2.13. <i>Layout</i> dos modelos de antena simples de <i>patch</i> elíptico criados, sendo: (a) 2,4
GHz sem elemento casador; (b) 3,5 GHz sem elemento casador; (c) 4,8 GHz sem
elemento casador
Figura 2.14. Perda de Retorno simulado para os modelos elípticos sem elemento casador
operando nas portadoras: () 2,4 GHz; () 3,5 GHz; () 4,8 GHz27
Figura 2.15. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado em () $\phi = 0^{\circ} e() \phi = 90^{\circ}$
para: (a) 2,4 GHz sem casador; (b) 3,5 GHz sem casador; (c) 4,8 GHz sem casador28
Figura 2.16. <i>Layout</i> dos <i>arrays</i> de dois elementos, sendo (a) A1: <i>array</i> de dois elementos
retangulares com elemento casador; (b) A2: <i>array</i> de dois elementos, sendo um deles
retangular e o outro elíptico, ambos sem elemento casador; (c) A3: array de dois
elementos, sendo um deles retangular com elemento casador e o outro elíptico sem
elemento casador; (d) A4: <i>array</i> de dois elementos elípticos sem elemento casador30
Figura 2.17. Resultados de perda de retorno simulado para: $(-)$ A1 e $(-)$ A231
Figura 2.18. Resultados de perda de retorno simulado para: () A3 e () A4
Figura 2.19. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para <i>array</i> A1 com $() \phi=0^{\circ} e$
$()\phi = 90^{\circ}$ para: (a) 3,53 GHz e (b) 4,53 GHz

Figura 2.20. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para <i>array</i> A2 com (—) $\phi=0^{\circ}$	e 33
Figure 2.21 Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para array A3 com $(-) = 0$	رد. م ٥
$() \phi = 90^{\circ} \text{ para: (a) } 3.48 \text{ GHz e (b) } 4.62 \text{ GHz}$	22
Figure 2.22 Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para array A4 com $(-)$ $\phi=0$	رد. م ٥
$()\phi = 90^{\circ}$ para: (a) 2,39 GHz e (b) 3,4 GHz.	.34
Figura 2.23. Layout dos arrays de 4 elementos, sendo (a) A ₅ : array de quatro elementos	
sendo todos elípticos; (b) A_6 : <i>array</i> de quatro elementos, sendo pares de padrões	
retangular e elíptico.	.35
Figura 2.24. Resultados de perda de retorno simulado em para: () A5 e () A6	.36
Figura 2.25. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para array A5 com () $\phi=0^{\circ}$	° e
$()\phi = 90^{\circ}$ para: (a) 2,85 GHz e (b) 3,30 GHz	.37
Figura 2.26. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para array A6 com () $\phi=0^{\circ}$	° e
$()\phi = 90^{\circ}$ para 3,53 GHz.	.37
Figura 2.27. Processo de fabricação dos arrays com a prototipadora LPKF s103	.38
Figura 2.28. Processo de proteção da antena e seu plano de terra para conclusão da fabricaç	ão
dos arrays.	. 39
Figura 2.29. Arrays fabricados para caracterização experimental	.40
Figura 3.1. Imagem do motor de passo do tipo (a) ímã permanente (b) relutância variável [5	;3].
	.42
Figura 3.2. Imagem do motor de passo do tipo híbrido [53]	.42
Figura 3.3. Imagem do motor de passo do tipo unipolar de (a) 6 (b) 5 e (c) 8 contatos [54]	.43
Figura 3.4. Imagem do motor de passo do tipo bipolar [54].	.43
Figura 3.5. Imagem do motor de passo adotado no projeto, modelo 28BY J-48.	.44
Figura 5.6. Circuito eletrico representando a conexao do motor de passo, <i>artver</i> de controle	e 15
Figure 3.7 Kit do módulo IR compatível com Arduino	.45 16
Figura 3.8. Conevão do Kit do módulo IR com Arduino Uno	.40 16
Figura 3.9. Conexão do módulo I CD 16x2 com Arduino Uno	.40 47
Figura 3.10. Circuito elétrico final do protótino proposto	. - 7 48
Figura 3.11 Protótino final desenvolvido com Arduino Uno	. - 0
Figura 4.1 Esquema representativo da conexão do gerador de sinal com o LabVIEW TM	54
Figura 4.2 Esquema representativo da conexão do analisador de sinal com o LabVIEW TM	54
Figura 4.3. Imagem do Gerador Vetorial de Sinal MG3700A da Anrtisu	.55
Figura 4.4. Diagrama de blocos desenvolvido para controle do gerador vetorial de sinal	.56
Figura 4.5. <i>Front Panel</i> do LabVIEW para controle do gerador vetorial de sinal	.56
Figura 4.6. Imagem do Analisador de Sinal MS2034A da Anrtisu	.57
Figura 4.7. Diagrama de blocos criado para controle do analisador vetorial de sinal	.58
Figura 4.8. <i>Front Panel</i> do LabVIEW para controle do analisador de sinal na função	
analisador de espectro.	.58
Figura 4.9. Esquema Representativo da conexão simultânea do gerador e do analisador de	
sinal com o Labview.	. 59
Figura 4.10. Fluxograma da lógica do arquivo de calibração.	.60
Figura 4.11. Front Panel do Arquivo de Calibração	.61
Figura 4.12. Fluxograma da lógica do arquivo do sistema de medição automático	. 62
Figura 4.13. Front Panel do programa de Medições elaborado no LabVIEW.	.63
Figura 4.14. Diagrama de Irradiação genérico.	.64
Figura 5.1. Comparação entre as curvas de Perda de Retorno medida (
para os casos: (a) protótipo A1 ; (b) protótipo A2; (c) protótipo A3; (d) protótipo A4	.66

Figura 5.2. Comparação entre as curvas de Perda de Retorno medida (
os casos: (a) protótipo A5; (b) protótipo A6
Figura 5.3. Diagrama de blocos do Setup de medição usado no LaProp/UFF69
Figura 5.4. Sistema de Medição implementado no LaProp/UFF71
Figura 5.5. Resultados de Diagrama de Irradiação do array A1 na frequência de 2,55 GHz nas
formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$;
(d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5.6. Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A1 na frequência de 3,4 GHz nas
formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$;
(d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5.7. Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>arrav</i> A1 na frequência de 4.8 GHz nas
formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$: (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$: (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$:
(d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5 8 Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A2 na frequência de 3 6 GHz nas
formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$: (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$: (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$:
(d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5 9 Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A2 na frequência de 4 655 GHz
nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$. (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$. (c) retangular para
$\phi = 90^{\circ}$. (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5 10 Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A3 na frequência de 2 87 GHz
nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$. (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$. (c) retangular para
$\phi = 90^{\circ}$. (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5 11 Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A3 na frequência de 3 48 GHz
nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$. (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$. (c) retangular para
$\phi = 90^{\circ}$. (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5.12 Resultados de Diagrama de Irradiação do $array$ A3 na frequência de 4.735 GHz
nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$. (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$. (c) retangular para
$\phi = 90^{\circ}$. (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5.13 Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A4 na frequência de 2.5 GHz nas
formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$: (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$: (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$:
(d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$, (b) point para $\phi = 0^{\circ}$, (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$,
Figura 5 14 Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A4 na frequência de 3 38 GHz
nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$: (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$: (c) retangular para
$\phi = 90^{\circ}$: (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
Figura 5.15 Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> AA na frequência de A 730 GHz
nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$: (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$: (c) retangular para
$\phi = 90^{\circ}$: (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
$\varphi = 50^{\circ}$, (d) l'etaliguiai para $\varphi = 50^{\circ}$
formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$: (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$: (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$:
(d) retangular para $\phi = 0^{\circ}$, (b) poiar para $\phi = 0^{\circ}$, (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$,
(d) retangular para $\psi = 50^{\circ}$
rigura 5.17. Resultados de Diagrama de madiação do <i>unay</i> A5 ha nequência de 5,54 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$: (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$: (c) retangular para
has formas. (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$, (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$, (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$
$\varphi = 90^{\circ}$, (d) Ictaliguial para $\varphi = 90^{\circ}$
Figura 5.18. Resultatos de Diagrama de madiação do <i>unay</i> AS ha frequência de 4,0 0112 has formas: (a) rotongular para $\phi = 0^{\circ}$: (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$: (c) rotongular para $\phi = 0^{\circ}$:
(d) retangular para $\phi = 00^{\circ}$, (b) polar para $\psi = 0^{\circ}$, (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$,
(u) retaliguial para $\psi = 50$
rigura 5.17. Resultatuos de Diagrama de maturação do <i>array</i> Ao na nequência de 2,65 GHZ nos formos: (a) rotongular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) rotongular para
has formas. (a) retangular para $\psi = 0$, (b) potar para $\psi = 0$, (c) retangular para $\phi = 00^{\circ}$:
$\psi - 90$, (u) retaingular para $\psi = 90^{\circ}$ 80

Figura 5.20. Resultados de Diagrama de Irradiação do array A6 na frequência de 3,43 GHz	Z
nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$; (c) retangular para	
$\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$	87
Figura 5.21. Resultados de Diagrama de Irradiação do array A6 na frequência de 4,89 GHz	Z
nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$; (c) retangular para	
$\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$	88
Figura 5.22. Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A4 na frequência de 2,5 GHz, sendo() resultado simulado, () resultado medido em ambiente real e (- ·) resultado medido na câmara anecóica nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para	do
$\Phi = 0^{\circ}.$	89
Figura 5.23. Resultados de Diagrama de Irradiação do <i>array</i> A6 na frequência de 3,43 GHz sendo() resultado simulado, () resultado medido em ambiente real e () resultado medido na câmara anecóica nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para	z, ido
$\Phi = 0^{\circ}$	90
Figura 5.24. Diagrama de Blocos representativo da medida da Pcalibração	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Faixas de Frequências do serviço de RFID no Brasil [42] [43].	6
Tabela 2.2. Faixas Frequências do serviço de 5G no Brasil e no mundo [44] [45]	7
Tabela 2.3. Características dos diversos tipos de geometria aplicados a patches de antena	as de
microfita	10
Tabela 2.4. Dimensões das antenas de patch retangular do tipo Edge Fed	21
Tabela 2.5. Dimensões da antena de patch retangular do tipo Inset Fed.	21
Tabela 2.6. Dimensões das antenas de patch elíptico do tipo Inset Fed.	25
Tabela 2.7. Arrays e Frequências Objetivos	29
Tabela 2.8. Dimensões em arrays de 2 elementos.	30
Tabela 2.9. Dimensões em arrays de 4 elementos.	35
Tabela 3.1. Correspondência das conexões entre display LCD 16x2 e Arduino Uno	47
Tabela 3.2. Correspondência das teclas do módulo I/R e o código de identificação	50
Tabela 5.1. Resumo da Perda de Retorno e VSWR experimental de cada array onde	
Fh: frequência harmônico e Fp: frequência de projeto.	67
Tabela 5.2. Largura de Banda Simulada e Medida para cada array.	68
Tabela 5.3. Distâncias Mínimas de campo distante para cada array.	70
Tabela 5.4. Ganho medido para o array A1	93
Tabela 5.5. Ganho medido para o array A2	93
Tabela 5.6. Ganho medido para o array A3	93
Tabela 5.7. Ganho medido para o <i>array</i> A4	93
Tabela 5.8. Ganho medido para o <i>array</i> A5	93
Tabela 5.9. Ganho medido para o array A6	94
Tabela 5.10. Resultados Medidos e Simulados para Largura de Feixe de Meia Potência.	94
Tabela 5.11. Resultados Medidos e Simulados para Largura de Feixe entre Nulos	95

LISTA DE SIGLAS

RFID	Radio Frequency Identification (Identificação por Rádio Frequência)
5G	Sistema móvel celular de quinta geração
AUT	Antenna Under Test (Antena sobre teste)
Rx	Reception (Recepção)
Tx	Transmission (Transmissão)
Pr	Potência recebida
GPIB	General Purpose Interface Bus
LAPROP	Laboratório de Antenas e Propagação
UFF	Universidade Federal Fluminense
HFSS	High Frequency Structure Simulator
ADK	Antenna Kit Design
FR-4	Flame Retardant 4
CPW	Coplanar Waveguide
HPBW	Half Power Beam Width
FNBW	FirstNull Beam Width
RFC	Relação Frente Costas
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
RL	Return Loss
IPqM	Instituto de Pesquisas da Marinha

xviii

Capítulo 1

Introdução

1.1. Justificativa

Os diversos sistemas de telecomunicações existentes e aplicados ao redor do mundo atualmente são compostos por cerca de sete elementos distintos, sendo eles: fonte, transdutor de entrada, transmissor, canal de transmissão, receptor, transdutor de saída e destinatário [1], conforme visto na figura 1.1.



Figura 1.1. Representação de um sistema de comunicação genérico [1].

Como exemplo desses sistemas, podem ser destacados: RFID (*Radio Frequency Identification*) e serviço de telefonia móvel de quinta geração (5G), que representam dois sistemas de comunicação vistos na figura 1.1 e que, atualmente, são frutos de pesquisas no Brasil e ao redor do mundo.

Os serviços de telefonia móvel celular, através de suas gerações, desde a primeira geração (1G) até a quinta geração (5G), já estão implementados na Europa, Ásia e alguns países americanos, por exemplo Estados Unidos [2]. O primeiro sistema de telefonia móvel celular, foi implementado em 1983 [3] e, desde então, se faz presente na vida das pessoas. A distinção entre as diversas gerações consiste na tecnologia e nos serviços e possibilidades oferecidos aos usuários [4]. Como características da quinta geração, destacam-se: utilização

de ondas milimétricas devido ao congestionamento do espectro, áreas de cobertura divididas em células menores (*small cells*), como representado na figura 1.2, altas taxas de transmissão e baixa latência [5].



Figura 1.2. Representação de um sistema de small cells para sistemas de comunicação 5G.

Os sistemas de RFID, que tem se tornado cada vez mais populares, consistem na captura de dados/informações através da utilização de frequências de rádio [6] [7] como ilustrado pela figura 1.3.



Figura 1.3. Representação de um sistema de RFID.

Embora sua popularização seja recente, esse sistema é conhecido desde a Segunda Guerra Mundial, aproximadamente 1930, quando a Marinha e o Exército tinham o desafio de identificar alvos e ameaças no solo, ar e água. A problemática surgia a partir da incapacidade de separação entre as aeronaves aliadas e inimigas [8]. Em 1937, o exército britânico e o laboratório de pesquisa naval norte-americano desenvolveram, conjuntamente, o sistema conhecido como "Friend-or-Foe", possibilitando a identificação de aviões aliados e inimigos, facilitando a tática de ataque e defesa utilizada nos combates [9].

Atualmente, são inúmeras as aplicações e os setores em que é possível empregar esses sistemas de identificação, por exemplo: controle de estoque [10] [11], segurança e controle de acesso [12], aplicações militares [13], pedágios [14], passaportes [15], rastreabilidade de gado [16], bilhete de transporte como o bilhete único usado no estado do Rio de Janeiro, no Brasil [17] e outros.

Um componente fundamental dos sistemas de comunicação, inclusive dos sistemas RFID e 5G, são as antenas. Elas são utilizadas para transmissão e recepção das ondas eletromagnéticas irradiadas e portadoras da informação [18], podendo melhorar ou comprometer o desempenho do sistema. Desse modo, o estudo desses dispositivos torna-se indispensável e é fruto de observação ao longo dos anos. A pesquisa e desenvolvimento em torno desse dispositivo ao longo dos anos possibilitou a implementação de diversos tipos de antenas, como por exemplo: antenas *loop*, antenas de abertura, antenas miniaturizadas de tecnologia de microfíta, antenas refletores, antenas cornetas, antenas lineares e outras [19].

Atualmente, as antenas de microfita têm despertado grande interesse devido às suas características eletromagnéticas, baixo custo e dimensões reduzidas [20-23]. Aliados a esses fatores, elas apresentam bom desempenho e possibilidade de operação em distintas bandas de frequência e fácil integração com circuitos impressos [24-26], portanto, esse modelo específico de antena é bastante utilizado em sistemas de comunicação militares, tecnologia aeroespacial, RFID e serviços de telefonia móvel [27-30].

Outra possibilidade para transmissão e recepção da informação, são os *arrays* ou conjuntos de antenas. Esses conjuntos consistem no agrupamento de dois ou mais elementos irradiantes, de modo que eles constituam um único elemento através da combinação dos sinais de cada um dos elementos individualmente [31]. Com a utilização de *arrays*, é possível aumentar a intensidade do sinal transmitido, redução de lóbulos secundários, aumento do ganho e da diretividade e ajuste de outros parâmetros e funções, dificéis de se obter usando apenas um elemento irradiante [32].

A fim de entender as características eletromagnéticas desses dispositivos e de seus conjuntos e qual tipo de antena é mais indicado a cada aplicação, é realizada a análise do diagrama de irradiação. Esse diagrama representa como a antena irradia no espaço e pode ser representado através de figuras tridimensionais ou bidimensionais [33].

Para determinação do diagrama de irradiação da antena, é necessário um campo de prova, conforme o ilustrado na figura 1.4, o ideal é realizar a caracterização em ambiente livre de reflexões e de fenômenos de propagação como, por exemplo, o multipercurso. Desse modo, o local ideal para realização das medidas é a câmara anecóica, que consiste em um

ambiente revestido de materiais absorvedores [34] nas paredes laterais, parede superior e no chão. A utilização desse tipo de material é necessária, pois eles são os responsáveis por absover a onda eletromagnética e, portanto, minimizar ou eliminar o efeito das ondas refletidas.



Figura 1.4. Diagrama esquemático de um campo de provas para medição de diagrama de irradição de antenas.

A técnica tradicional e ilustrada pela figura 1.4 consiste na transmissão (Tx) de um sinal, através da antena transmissora, destinado à antena receptora, chamada de antena sobre teste (AST) que se encontra na recepção (Rx). O registrador gráfico (RG), dispositivo equipado com uma estrutura circular, que é capaz de girar na mesma velocidade angular (ϕ) da base receptora, é conectado à recepção a fim de registrar os valores de potência recebido (Pr).

Outra técnica, muito utilizada em laboratórios, opera com uma espécie de "grande transferidor", feito em cartolina na maioria das vezes, e a AUT é conectada a um suporte. Para caracterização da antena nas diversas regiões do espaço, esse suporte é girado, rotacionando a AUT, de modo que seja possível medir a potência recebida em cada ponto do espaço.

Além das técnicas mencionadas, existem *softwares*, como LabVolt, que permitem a caracterização das antenas. A problemática com as técnicas atuais consiste em seu alto custo, complexidade e, em alguns casos, falta de precisão, uma vez que a precisão está associada ao campo de visão do técnico, portanto, observa-se na comunidade científica, o contínuo e crescente interesse na pesquisa e desenvolvimento de outras plataformas alternativas [35-38], para a medição dos diagramas para diversos tipos de antenas e de aplicações. Dentre as características desses protótipos, destacam-se: baixo custo [39], alta precisão [40] e automatização [41]. Assim, essa dissertação possui como objetivos:

 Estudo e desenvolvimento de antenas e *arrays* de antenas aplicados aos sistemas de RFID e 5G, simultaneamente (antenas banda dupla);

- Desenvolvimento de uma plataforma de baixo custo para medição do diagrama de irradiação das antenas desenvolvidas;
- Sistema de automatização, utilizando LabVIEW e Matlab, para controle dos equipamentos de transmissão e recepção do sistema;
- Realização de medidas de diagrama de irradiação para caracterização dos protótipos de antenas desenvolvidos comparando medições em ambiente real (*indoor*) e na câmara anecóica.

Esse trabalho de dissertação foi oraganizado em mais cinco capítulos, como descrito a seguir.

O Capítulo 2 apresenta o projeto, simulação e a fabricação de antena impressa e de *arrays* de antenas com duas e três bandas. Esta etapa do trabalho corresponde ao desenvolvimento e simulação do projeto de antenas impressa nas portadoras de 2,4 GHz, 3,5 GHz e 4,8 GHz, visando aplicação nos sistemas de RFID e 5G.

O Capítulo 3 compreende o desenvolvimento do protótipo de baixo custo utilizando *software* livre, Arduino, para auxiliar na caracterização das antenas. Esta fase do trabalho detalha a construção no nível de: circuito elétrico/eletrônico (*hardware*), lógica de programação (*software*) e componentes e materiais utilizados na fabricação do mesmo.

O Capítulo 4 compreende a automatização do protótipo desenvolvido através do controle dos equipamentos utilizados no sistema, em sua transmissão e recepção, através dos softwares LabVIEW e Matlab com a utilização da interface GPIB (*General Purpose Interface Bus*) para conexão entre os equipamentos e o computador.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos na caracterização das antenas utilizando o protótipo de medição desenvolvido. Esses resultados são dividos em dois ambientes, a saber: ambiente ideal para medição de diagrama de irradiação, a câmara anecóica, e um ambiente *indoor* com possibilidade do fenômeno do multipercurso, sendo esse uma sala do Laboratório de Antenas e Propagação (Laprop) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

O Capítulo 6 é destinado à conclusão do trabalho a partir dos resultados obtidos e previamente analisados e discutidos. São, ainda, indicados trabalhos futuros, os quais se pretende dar prosseguimento após a conclusão do curso de mestrado. Além disso, são propostas possíveis melhorias a serem implementadas à plataforma e às antenas.

Capítulo 2

Projeto das Antenas Impressas para RFID e 5G

2.1. Introdução

Conforme já mencionado no capítulo 1, as antenas impressas possuem várias vantagens em relação aos demais modelos de antenas presentes na literatura, portanto, este capítulo compreende a fase de projeto dessas antenas no *software* HFSSTM, através da ferramenta *Antenna Design Kit (ADK)*, operando nas portadoras dos serviços de RFID e 5G no Brasil e em outras partes do mundo.

Como o serviço de RFID é baseado na utilização de frequências de rádio para transmissão da informação, os elementos do sistema podem ser projetados e sintonizados em frequências diferentes como pode ser visto na tabela 2.1.

Faixa de Frequências	Características	Algumas Aplicações
Baixa: 100-150 kHz	Baixo raio de alcance; Baixo custo; Baixa velocidade de leitura.	Identificação de animais; Depósitos; Identificação de veículos em garagens.
Média: 10-15 MHz	Médio raio de alcance; Custo razoável; Velocidade de leitura média.	Smartcards; Bilhete Único.
Alta: 850-950 MHz	Bom raio de alcance; Custo mais elevado; Velocidade de leitura rápida.	Monitoramento de carros no trânsito.
Super Alta: 2,4-2,5 e 5,8 GHz	Grande raio de alcance; Alto custo; Velocidade de leitura rápida	Monitoramento de carros no trânsito; Cobrança de pedágios.

Tabela 2.1 Faixas de Frequências do serviço de RFID no Brasil [42] [43].

Os dispositivos comerciais que atendem à faixa de frequência super alta desse serviço, apresentam elevado custo, uma vez que eles requerem alta velocidade de leitura em relação aos dispositivos das demais faixas de frequência.

O serviço de quinta geração (5G) está tendo sua implementação iniciada ao redor do mundo, por isso não existem faixas de frequências já estabelecidas para esse serviço. Entretanto, no Brasil e nos demais países existem pesquisas de alocação de faixa de frequência para esse serviço como é visto na tabela 2.2.

Com base nas informações contidas na tabela 2.2, as antenas são projetadas para frequências abaixo de 5GHz, pois para o projeto para atender as frequências superiores possui dimensões reduzidas e que poderiam não ser atendidas pela máquina prototipadora utilizada no processo de fabricação. Além disso, a maioria das pesquisas no Brasil são destinadas a portadora de 3,5 GHz, por isso, as frequências trabalhadas no projeto de antenas para o 5G são 3,5 GHz e 4,8 GHz, podendo atender o Brasil e as demais regiões do mundo descritas na tabela.

País/Bloco	Faixa de frequência abaixo de 5	Faixa de frequência acima de 5
	GHz	GHz
União Européia	3,4 - 3,8 GHz	24,25 - 27,25 GHz
China	3,3 - 3,6 GHz/4,8 - 4,99 GHz	14/ 24,25 - 27,5/ 38 - 43,5 GHz
Japão	3,6 - 4,2 GHz/4,4 - 4,9 GHz	27,5 - 28,28 GHz
Coréia do Sul	3,4 - 3,8 GHz	26,5 - 29,5 GHz
Estados Unidos	3,1 - 3,55 GHz; 3,7 - 4,2 GHz	27,5 - 28,35 GHz/37 - 40 GHz
Brasil	2,3-2,4 GHz/ 3,3-3,6 GHz	26 GHz

Tabela 2.2. Faixas Frequências do serviço de 5G no Brasil e no mundo [44] [45].

O dimensionamento das antenas impressas foi baseado no substrato disponibilizado no LaProp, o material FR-4 (*Flame Retardant 4*), cujas características são: constante dielétrica (ϵ r) igual a 4,3; tangente de perdas (tan δ) igual a 0,002; altura do substrato (h) igual a 1,575 mm; e espessura de metalização (t) igual a 35 µm. Este material foi escolhido em virtude de sua ampla utilização para fabricação de circuitos elétricos e eltrônicos, além de seu baixo custo. Os projetos que apresentaram os melhores resultados de simulação foram, então, fabricados no material FR-4 e testados, posteriormente.

Este capítulo está organizado em mais sete seções. Na Seção 2.2, são abordados os tipos de antena de microfita presentes na literatura. Na seção seguinte são apresentados os parâmetros referentes às antenas e que são analisados nos seus projetos e simulações. A Seção 2.4 apresenta o projeto das antenas individuais, enquanto as seções 2.5 e 2.6 apresentam os

projetos dos *arrays* de 2 e 4 elementos, respectivamente. Na seção 2.7 é vista a descrição do processo de fabricação dos protótipos que apresentaram melhores resultados na simulação. Por fim, na Seção 2.8, faz-se uma breve conclusão do capítulo.

2.2. Antenas de Microfita

As antenas de microfita ou antenas de circuito impresso surgiram na década de 50, nos Estados Unidos, com o desenvolvimento feito por Deschamps, em 1953, e na França, em 1955, Gutton e Baissionot patentearam a primeira antena de circuito impresso. As maiores pesquisas e fabricações dessas antenas, entretanto surgiram na década de 70. Hoje em dia, elas são amplamente encontradas em sistemas de micro-ondas devido a sua dimensão reduzida possibilitar a aplicação em sistemas de alta frequência. Além desses sistemas, elas são empregadas em aparelhos e sistemas sem fio e de comunicação de rádio frequência, pois possuem custo e fabricação reduzido, são moldavéis a superfícies planares e não-planares e versáteis em relação à polarização da onda eletromagéntica transmitida [46].

Essas antenas são constituídas, basicamente, de duas placas condutoras paralelas com material dielétrico entre elas. A esse material é dado o nome de substrato. A placas condutoras são chamadas de plano de terra e *patch*, sendo *patch* o elemento irradiante formado por, pelo menos, um elemento. Além desses elementos, há a presença de um alimentador onde o sinal de entrada é alimentado [47]. Na figura 2.1, é observado o projeto de uma antena de *patch* metálico de comprimento L, largura W, espessura t, substrato com espessura h e permissividade elétrica ε_r e o plano de terra.





2.2.1. Definição do Patch

O *patch* é definido como elemento irradiante da antena que deve ser constituído de material condutor, em geral o cobre é o adotado, além disso, ele pode assumir diversos tipos de geometria, como é observado na figura 2.2.



Figura.2.2. Exemplos de formas geométricas assumidas pelo patch [49].

Cada modelo de *patch* possui características distintas, portanto, para determinadas aplicações um modelo é mais vantajoso que o outro. As principais características desses modelos são vistas na tabela 2.3.

Geometria do	Características
Patch	
Quadrado	Muito usado por apresentar maiores larguras de banda e possibilitar
	polarização circular.
Retangular	Muito usado por apresentar maiores larguras de banda e possibilitar
	polarização circular.
Dipolo	Largura de Banda grande. Devido a seu tamanho, ocupam menores
	espaços.
Setor de Anel	Largura de Banda apropriada para sinais modulados em frequência.
Triangular	Devido a sua simetria, é capaz de gerar altos níveis de polarização
	cruzada.
Circular	Forma bastante utilizada apresentando boa largura de banda.
Elíptico	Forma bastante utilizada apresentando boa largura de banda devido à
	polarização da onda eletromagnética transmitida.
Anel	Ganho e Largura de Banda limitados e dificuldade de casamento de
	impedância.

Tabela 2.3. Características dos diversos tipos de geometria aplicados a *patches* de antenas de microfita

Levando em consideração as portadoras de funcionamento desejadas para as antenas e as características dos *patchs* mostrados na tabela 2.3, as geometrias de trabalho adotadas são: retangular e circular.

2.2.2. Definição do Substrato

O substrato é o elemento que fica entre o *patch* e o plano de terra, deve ser composto de um material classificado como dielétrico. Seu conhecimento se torna imprescindível ao projeto de antenas, uma vez que para realizar uma transmissão adequada, é necessário

conhecer bem as características do meio de propagação do sinal, que no caso das antenas de microfita é o substrato.

O elemento mais sensível na escolha do substrato é sua permissividade elétrica (ε_r), pois ela se relaciona com a frequência de ressonância do protótipo e dispositivo a ser fabricado, além de influir no tamanho e na largura de banda. Ao modificar o material usado no substrato, é possível verificar o deslocamento da frequência de operação da antena. Ao utilizar um material com alta ε_r , o tamanho da antena é diminuído e, por outro lado, ocorre redução da largura de banda, da eficiência da antena e do seu ganho [48].

A escolha da tangente de perdas (δ) também influi nas caracteríticas da antena no tocante à sua alimentação, uma vez que uma alta tangente de perdas diminui a eficiência da antena e aumenta as perdas na alimentação. O ideal é escolher um material com baixa tangentes de perdas e permissividade elétrica adequada ao projeto. Por essas razões, o substrato escolhido é o FR-4.

No mercado, existem diversos tipos de substrato para comercialização, com permissividades elétricas variando de 1,17 a 25 e tangente de perdas variando de 0,0004 a 0,0023.

2.2.3. Técnicas de Alimentação

A alimentação da antena deve considerar o tamanho da antena, a largura de banda de operação e o casamento de impedância [49]. As técnicas podem ser divididas em diretas ou indiretas. Dentre as técnicas diretas, destacam-se a alimentação via cabo coaxial e por linha de microfita, enquanto nas indiretas tem-se a alimentação por acoplamento por proximidade e por abertura.

A alimentação via cabo coaxial consiste da conexão do condutor interno e externo do cabo com elementos da antena de microfita. O contudor interno é conectado ao *patch* e o externo, ao plano de terra. Com a alimentação por linha de transmissão, uma linha de microfita de largura inferior a do *patch*, é conectada diretamente a ele. Na figura 2.3, são vistas essas técnicas de alimentação.



Figura 2.3 Exemplos de técnicas de alimentação direta: (a) via cabo coaxial (b) via linha de transmissão ([50]).

As técnicas de alimentação indireta, vistas na figura 2.4, são feitas sem estabelecimento de contato entre o alimentador e o elemento irradiante da antena. Na técnica de acoplamento por proximidade, são utilizados dois substratos distintos, de modo que o elemento irradiante fique no superior e a alimentação no inferior, tornando sua fabricação difícil pois os dois elementos devem estar alinhados. No acoplamento por abertura, também são utilizados dois substratos diferentes, mas eles devem ser separados por um plano de terra e deve ter uma abertura para realizar a alimentação entre o *patch* na camada superior e a alimentação no inferior.



Figura 2.4. Exemplos de técnicas de alimentação indireta: (a) acoplamento por proximidade (b) acoplamento por abertura ([50]).

Tendo em vista os tipos de alimentação apresentados adotou-se a alimentação via linha de microfita, para construção do projeto das antenas, devido sua simples fabricação, modelagem e facilidade no casamento de impedâncias.

2.2.4. Tipos de Antenas de Microfita

As antenas de microfita são projetadas a partir de linhas de transmissão para alta frequência, podendo ser: *microstrip*, *stripline*, *slotline* e linhas acopladas (CPW). Cada um desses quatro tipos influenciam o comportamento da antena.

A linha *microstrip* consiste em uma linha gravada sobre um substrato com a face inferior metalizada, o plano de terra. As linhas acopladas são separadas por um par de planos de terra e as linhas do tipo *stripline* são linhas condutoras em um meio dielétrico, cujas superfícies externas são formadas por placas condutoras. Por fim, as linhas do tipo *slotline* são formadas por dois condutores espaçados sobre a superfície do dielétrico [50].

As antenas projetadas e fabricadas neste trabalho são baseadas nas linhas do tipo *microstrip*, uma vez que elas são fáceis de equacionar, fabricar, são amplamente utilizadas na fabricação de antena e outros dispositivos de alta frequência e possui perdas nos condutores reduzidas se comparadas com os demais tipos de linha apresentados.

2.3. Parâmetros de desempenho das antenas

Para avaliar o desempenho das antenas e decidir qual o melhor modelo para determinada aplicação, é necessário avaliar determinados parâmetros, definidos para qualquer tipo de antena. Esses parâmetros são descritos nas sub-seções a seguir.

2.3.1. Polarização

A polarização se refere à orientação da oscilação do campo elétrico irradiado pela antena. Ela pode ser classificada como: linear, circular e elíptica, como pode ser exemplificado na figura 2.5.



Figura 2.5. Exemplos de polarização das ondas eletromagnéticas [48].

Na polarização linear, o vetor do campo elétrico ou campo magnético traça uma linha no espaço à medida que se propaga e possui amplitude variante no tempo. Ela pode ser horizontal ou vertical dependendo da orientação do campo com a superfície de propagação. Na polarização circular, o vetor do campo elétrico ou campo magnético descreve uma circunferência no espaço com amplitude constante. Ele pode variar no sentido horário, recebendo o nome de polarização circular à direita, e no sentido anti-horário, recebendo o nome de polarização circular à esquerda. Já na polarização elíptica, a figura geométrica descrita pela trajetória do campo elétrico propagados é a elipse com amplitude variante no tempo. Ela pode ser representada pela composição de duas ondas circulares com amplitudes diferentes entre si, sendo uma delas polarizada à direita e a outra, à esquerda.

2.3.2. Diagrama de Irradiação

O diagrama de irradiação é a representação gráfica do padrão de irradiação da antena em regiões de campo distante, na maioria dos casos. Essa representação pode ser em três dimensões (3D) ou em duas dimensões (2D), como é visto na figura 2.6. Devido à dificuldade na reprodução do diagrama 3D, experimentalmente, os diagramas bidimensionais, que representam cortes nos diagramas 3D, nas formas retangular e polar são mais tradicionais na representação da antena.



Figura 2.6. Representação do diagrama de irradiação da antena nas formas: (a) tridimensional (b) bidimensional polar e (c) bidimensional retangular [46].

2.3.3. Lóbulos e largura de feixe de meia potência e largura entre nulos

Através da análise dos diagramas de irradiação é possível observar a região com maior concentração de energia irradiada. A essa região dá-se o nome de lóbulo principal. De modo análogo, as regiões com menor intensidade de energia são chamadas de lóbulos secundários.

A largura de feixe indica o quanto a antena concentra energia próximo ao lóbulo principal. As duas medidas de largura de feixe mais usadas são a largura de feixe de meia potência (BW_3), também conhecida como *Half-Power BeamWidth* (HPBW) e a largura de feixe entre nulos (BW_0) ou *First-Null BeamWidth* (FNBW). A medida de HPBW corresponde à largura de feixe limitada à irradiação onde a potência no lóbulo principal cai a metade, e a medida de FNBW indica a largura de feixe limitada à irradiação do lóbulo principal, situada

entre os primeiros nulos adjacentes a tal lóbulo. Na figura 2.7, é possível ver a representação desses conceitos em um diagrama de irradiação bidimensional na forma retangular.



Figura 2.7. Representação dos conceitos de lóbulo principal, secundário, HPBW e FNBW no diagrama de irradiação [51].

2.3.4. Relação Frente-Costas

A relação frente-costas (RFC) é definida como a relação entre a potência máxima do lóbulo principal (P_{lp}) e aquela irradiada na direço oposta (P_o), matematicamente representado pela equação (2.1).

$$RFC(dB) = 10\log(\frac{P_{lp}}{P_o})$$
(2.1)

2.3.5. Perda de Retorno

A perda de retorno é a razão, logarítmica, entre a potência refletida (P_r) e a potência entregue à antena através da alimentação (P_e). Pode ser calculada em função do coeficiente de reflxão (Γ) e/ou da taxa de onda estacionária (VSWR), como é visto nas equações (2.2) e (2.3).

$$RL(dB) = -20 \log |\Gamma| = -20 \log \sqrt{\frac{(P_r)}{P_e}}$$
 (2.2)

$$RL(dB) = 20\log(\frac{VSWR + 1}{VSWR - 1})$$
(2.3)

Esse parâmetro nos permite concluir a melhor frequência de operação da antena, uma vez que quanto maior for o valor de RL em uma determinada frequência.

2.3.6. Diretividade, Ganho e Eficiência

Esses três parâmetros estão intrinsicamente relacionados entre si. A diretividade pode ser definida como a relação entre a intensidade de máxima radiação e a intensidade de radiação média de uma antena isotrópica, como visto na equação (2.4).

$$D_{max} = -\frac{U_{max}}{U_0} \tag{2.4}$$

O ganho é definido como a relação entre a potência que ela irradia a potência total que chega à antena (P_{ent}), como visto na equação (2.5).

$$G = -\frac{U_{max}}{P_{ent}}$$
(2.5)

Como pode ser visto através das equações (2.4) e (2.5), esses conceitos se relacionam e à essa relação é dado o nome de eficiência (η), que representa o percentual de potência total que é irradiado. Matematicamente, está definida pela equação 2.6.

$$G = \eta * D \tag{2.6}$$

2.3.7. Largura de Banda

É a faixa de frequências em que a antena apresenta seu melhor desempenho, de acordo com um padrão especificado. Pode ser representada em seu valor absoluto, equação (2.7), e em valor percentual, equação (2.8).

$$BW = f_2 - f_1 (2.7)$$

$$BW = 100 * \left(\frac{f_2 - f_1}{f_0}\right) \tag{2.8}$$

Na equações (2.7) e (2.8), f_1 e f_2 correspondem às frequências mínima e máxima de operação, respectivamente, enquanto que f_0 é a frequência central de operação.

Um critério adotado, praticamente, para determinação da largura de banda da antena é através do gráfico de Perda de Retorno versus Frequência. Para tal, o limiar de 10 dB é adotado, significando que o coeficiente de reflexão equivale a 10%, ou seja, 10% da potência entregue à antena é refletida e 90% é transmitida. Assim, a faixa de operação da antena é aquela para a qual a RL está acima de 10 dB.

2.4. Projeto de Antena com Patch Retangular

A antena de *patch* retangular é composta por um elemento irradiante de geometria retangular e pode ser classificada em dois tipos: *Edge Fed ou Inset Fed*. O tipo *Edge Fed* possui uma estrutura casadora de impedância do tipo $\frac{\lambda}{4}$ entre o elemento irradiante e a linha microstrip de alimentação. O tipo *Inset Fed* é caracterizado pela ausência desse elemento casador entre os elementos.

Os projetos dessas antenas foram desenvolvidos no *software HFSS* através da ferramenta *Antenna Kit Design* (ADK). Essa ferramenta implementa as equações de linha *microstrip* presentes na literatura [18] [20] para desenvolvimento da antena. Os parâmetros de entrada são: frequência de operação da antena e as características do material dielétrico a ser utilizado na fabricação, que no caso desse projeto foi o FR-4.

Neste trabalho, foram projetadas três antenas, a saber: *patch* retangular com elemento casador operando em 3,4 GHz e 4,8 GHz e *patch* retangular sem elemento casador também
operando em 3,4 GHz. Nas figuras 2.8 e 2.9 é possível ver a criação dos protótipos para a portadora de 3,4 GHz.

Overview	Edge Fed Rectangular P	sich Antenna	
Monopole Dispole Dispole Patch Rectangular-Totga Fad Rectangular-Totga Fad Rectangular-Totga Fad Rectangular-InsetFed Displical-InsetFed Displical-InsetFed Hom Planar Spicel Concel Spiral Linear Taper Slot Voeld Log Periodic PRA Waveguide Bootie Bicone Discone Hella Stat Scheme	Units Solution Frequency (SH4) Patch Dimension Along x Patch Dimension Along y Substrate Dimension Along y Substrate Dimension Along y Edge Feed Unit Edge Feed Length Feed Width Feed Length Outer Boundary	(H) 34 271 200 1575mm 315 0.074 1.28 0.356 2.034 ABC v	- H
Custom Antenna		Operating Frequency	
		Terra states white	2

Figura 2.8. Criação do modelo *patch* retangular com elemento casador para portadora de 3,4 GHz no ADK.

Overview	Inset Fed Rectangular P	tch Antenna	
Pencappoe Dipole Patch Rectangular-Edga Fed Rectangular-Edga Fed Heatangular-InsetFed Elliptical-Probe Fed Elliptical-InsetFed Hom Planar Spiral Concol Spiral Limear Taper Stot Vivaddi Log Penodic PIFA Waveguide Biocone	Units Solution Frequency (SiHz) Patich Devension Along x Patich Devension Along y Substrate Thickness Substrate Devension Along x Substrate Devension Along y Yeart Datance Hold Gap Freed Width Freed Length Outer Boundary	01	And and a second
Slot Antenna Custom Antenna	Create Model Solver Ty	pa	Operating Frequency Frequency (CHz) 3.4

Figura 2.9. Criação do modelo *patch* retangular sem elemento casador para portadora de 3,4 GHz no ADK.

Nas figuras 2.8 e 2.9 são vistos os parâmetros de cada tipo de antena a ser criado e suas respectivas dimensões. O significado de cada dimensão é visto a seguir:

- Units: Unidade da dimensão do projeto, pode ser cm ou inch (polegada);
- Solution Frequency (GHz): Frequência de projeto da antena, em GHz;
- Patch Dimension Along x: Dimensão do patch ao longo do eixo x;
- Patch Dimension Along y: Dimensão do patch ao longo do eixo y;
- Substrate Thickness: Espessura do substrato, pode ser em mm ou cm;
- Substrate Dimension Along x: Dimensão do substrato ao longo do eixo x;
- Substrate Dimension Along y: Dimensão do substrato ao longo do eixo y;
- Edge Feed Width: Largura do elemento casador de $\frac{\lambda}{4}$;
- *Edge Feed Length:* Comprimento do elemento casador de $\frac{\lambda}{4}$;
- Feed Width: Largura da linha de alimentação;
- Feed Length: Comprimento da linha de alimentação;

No caso dos projetos envolvendo *patch* sem elemento casador, *Edge Feed Width* e *Edge Feed Length* são substituídos por *Inset Distance* e *Inset Gap*.

- Inset Distance: Comprimento de separação entre início do patch e a linha de alimentação;
- Inset Gap: Largura da separação entre patch e linha de alimentação.

Por serem de modelos e operarem em frequências distintas, cada uma das antenas possui suas próprias dimensões. A escolha das frequências para esse padrão visava atender ao serviço de telefonia móvel 5G. No caso do *patch* retangular do tipo *Edge Fed*, as dimensões obtidas através de simulação podem ser vistas na tabela 2.4, e, para o *patch* do tipo *Inset Fed*, na tabela 2.5 apresenta as dimensões dos parâmetros. Na figura 2.10, podem ser vistos os *layouts* dos modelos retangulares.

Tipo/Parâmetro	Patch X	Patch Y	Substrato X	Substrato Y	Edge Feed Width	Edge Feed Length	Feed Width	Edge Feed Width
3,4 GHz	2,71	2,08	5,00	9,15	0,074	1,28	0,306	2,034
4,8 GHz	1,92	1,45	3,80	6,46	0,074	0,907	0,306	1,441

Tabela 2.4. Dimensões das antenas de *patch* retangular do tipo *Edge Fed*.

Tabela 2.5. Dimensões da antena de *patch* retangular do tipo *Inset Fed*.

Tipo/Parâmetro	Patch X	Patch Y	Substrato	Substrato	Inset	Inset	Feed	Edge
			х	Y	distance	gap	Width	Feed
								Width
3,4 GHz	2,71	2,08	5,00	6,46	0,69	0,153	0,306	2,034



Figura 2.10. *Layout* dos modelos de antena simples de *patch* retangular criados, sendo: (a) 3,4 GHz com elemento casador; (b) 4,8 GHz com elemento casador; (c) 3,4 GHz sem elemento casador.

Para verificar a melhor frequência de operação dessas antenas, a perda de retorno foi verificada. O objetivo é atender ao serviço de telefonia móvel de quinta geração no Brasil ou em alguma outra região do mundo. Para isso, foi comparado se a melhor frequência de operação atendia à tabela 2.2. Os resultados de perda de retorno das três antenas são vistos na figura 2.11 e o código é visto no Anexo A.



Além da perda de retorno, o diagrama de irradiação para $\phi = 0^{\circ} e 90^{\circ}$ também foram analisados para conhecer o padrão de irradiação da antena e ver se seria aplicável ou não. Os diagramas de irradiação simulados para essas antenas são vistos na figura 2.12.



Figura 2.12. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado em (\rightarrow , $\phi=0^{\circ}$ e ($\cdots\cdots$) $\phi=90^{\circ}$ para: (a) 3,4 GHz com casador; (b) 4,8 GHz com casador; (c) 3,4 GHz sem casador.

2.5. Projeto de Antena com Patch Elíptico

A antena de *patch* elíptico é composta por um elemento irradiante de geometria elíptica e pode ser classificada em dois tipos: *Edge Fed ou Inset Fed*.

Nesse caso, o único modelo projetado é do tipo *Inset Fed* e foram projetados três modelos. O primeiro visando atender o RFID, operando em 2,4 GHz, e os outros dois buscando atender o 5G, operando em 3,5 GHz e 4,8 GHz.

Da mesma forma que o *patch* retangular, os projetos dessas antenas foram desenvolvidos no *software HFSS* através da ferramenta *Antenna Kit Design* (ADK), colocando como parâmetros de entrada a frequência de operação da antena e as características do material dielétrico a ser utilizado na fabricação, neste caso o FR-4. Os parâmetros para criação desse modelo são os mesmos mencionados e já explicados para o modelo retangular.

Embora, nesse caso, todos os três modelos sejam do mesmo tipo (*Inset Fed*), eles possuem dimensões diferentes, uma vez que são projetados para atender frequências diferentes. As dimensões dos três modelos são vistas na tabela 2.6 e o *layout* dos modelos é visto na figura 2.13.

Tipo/Parâmetro	Patch X	Patch Y	Substrato	Substrato	Inset	Inset	Feed	Edge
			х	Y	distance	gap	Width	Feed
								Width
2,4 GHz	3,84	2,98	6,70	9,18	0,986	0,153	0,306	1,441
3,5 GHz	2,63	2,02	4,90	6,27	0,67	0,153	0,306	1,976
4,8 GHz	1,92	1,45	3,80	4,55	0,482	0,153	0,306	1,441

Tabela 2.6. Dimensões das antenas de patch elíptico do tipo Inset Fed.



Figura 2.13. *Layout* dos modelos de antena simples de *patch* elíptico criados, sendo: (a) 2,4 GHz sem elemento casador; (b) 3,5 GHz sem elemento casador; (c) 4,8 GHz sem elemento casador.

Como no caso do *patch* retangular, para verificar a melhor frequência de operação dessas antenas, a perda de retorno foi verificada. O objetivo é atender o serviço RFID e de telefonia móvel de quinta geração. Para isso, foi comparado se a melhor frequência de operação atendia as tabelas 2.1 e 2.2, respectivamente. Os resultados de perda de retorno das três antenas são vistos na figura 2.14 e o código é visto no Anexo B.



Figura 2.14. Perda de Retorno simulado para os modelos elípticos sem elemento casador operando nas portadoras: (----) 2,4 GHz; (----) 3,5 GHz; (-----) 4,8 GHz.

Além da perda de retorno, o diagrama de irradiação para $\phi = 0^{\circ} e 90^{\circ}$, também foram analisados para conhecer o padrão de irradiação da antena e ver se seria aplicável ou não. Os diagramas de irradiação simulados para essas antenas são vistos na figura 2.15.



Figura 2.15. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado em ($\rightarrow-\phi=0^{\circ}$ e ($\rightarrow-\phi=90^{\circ}$ para: (a) 2,4 GHz sem casador; (b) 3,5 GHz sem casador; (c) 4,8 GHz sem casador.

Das simulações foram observadas, boas perdas de retorno nas frequências desejadas e com diagramas de irradiação diretivos, eles são validados e servem como modelos-base para a composição dos *arrays* de 2 e 4 elementos, que são objeto de estudo da próxima seção.

2.6. Projeto de Array de antenas com dois elementos

Para construção do projeto de *array* de dois elementos, as antenas usadas como base são os elementos individuais vistos na seção 2.4. O objetivo é criar *arrays* elementos de mesma forma geométrica e de formas distintas abrangendo o serviços de 5G ou RFID, ou ainda, ambos serviços, simultaneamente. Além disso, o objetivo principal era a alimentação única do *array* e nãoalimentar cada elemento individualmente.

O procedimento consistiu na importação de um modelo de antena ao outro projeto da antena individual, de forma a ter duas antenas no mesmo projeto e no mesmo substrato. Para garantir que não haja interferência significativa entre os elementos, recomenda-se que a distância entre o centro dos elementos seja de, pelo menos, $2 * \lambda$, sendo λ o maior entre os dois elementos, portanto, o da menor frequência [48]. Entretanto, se essa medida fosse adotada nesse projeto, a dimensão do substrato seria superior a 30 cm, o que tornaria sua fabricação inviável, pelas limitações do laboratório. Desse modo, foi investigada uma distância de modo a minimizar as interferências e possibilitar a fabricação do projeto, por isso, a distância adotada foi igual a $\frac{\lambda}{2}$, sendo o maior comprimento de onda entre os dois elementos, portanto, o da menor frequência. [52]

Posteriormente, para atender o objetivo principal, foram testados dois tipos de alimentação, sendo: alimentação em forma de Y e alimentação em forma de T. Resultados de simulação permitiram concluir que a alimentação em Y é a melhor, pois apresenta melhores resultados de perda de retorno, portanto, melhor casamento.

Em suma, os projetos de *array* de 2 elementos são feitos separando os dois elementos de uma distância $d = \frac{\lambda}{2}$ com alimentação única em formato de Y. Baseados nessas características, foram criados quatro *arrays* de 2 elementos, onde os arrays $A_1, A_2 e A_3$ tem como objetivo o 5G nas frequências fundamentais de 3,4 GHz e 4,8 GHz, e o array A_4 possui objetivo de atender ao RFID e ao 5G nas portadoras de 2,4 GHz e 3,4 GHZ, como é visto na figura 2.16. Um breve resumo sobre os arrays e as frequências objetivo é visto na tabela 2.7.

Array	Frequência (GHz)
<i>A</i> ₁	3,5 e 4,8
A_2	3,5 e 4,8
A_3	3,5 e 4,8
A_4	2,4 e 3,5

Tabela 2.7. Arrays e Frequências Objetivos



Figura 2.16. *Layout* dos *arrays* de dois elementos, sendo (a) A1: *array* de dois elementos retangulares com elemento casador; (b) A2: *array* de dois elementos, sendo um deles retangular e o outro elíptico, ambos sem elemento casador; (c) A3: *array* de dois elementos, sendo um deles retangular com elemento casador e o outro elíptico sem elemento casador; (d) A4: *array* de dois elementos elípticos sem elemento casador.

As dimensões $d_1 e l_1$ vistas na figura 2.16 correspondem à distância entre os elemetos do *array* (d) e ao comprimento, respectivamente. Essas dimensões são vistas na tabela 2.8.

Array/Dimensão	$d_1(cm)$	$l_1(cm)$	$l_2(cm)$	Θ (°)
A ₁	4,4115	11,005	4,4115	37,5
A_2	4,4115	10,000	4,4115	37,5
A ₃	4,4115	11,225	4,4115	37,5
A_4	6,25	12,315	3,125	41

Tabela 2.8. Dimensões em arrays de 2 elementos.

As curvas de perda de retono de cada um dos *arrays* projetados podem ser vistas nas figuras 2.17 e 2.18 e o código desenvolvido para plotagem da perda de retorno para esses *arrays* é visto no Anexo C.



Figura 2.17. Resultados de perda de retorno simulado para: ($\rightarrow A_1 e$ ($\rightarrow A_2 e$).



Figura 2.18. Resultados de perda de retorno simulado para: (\rightarrow A₃ e (\rightarrow)·A₄.

Ao analisar os resultados apresentados pelas figuras 2.17 e 2.18, é identificado um pequeno deslocamento da frequência de projeto individual das antenas. Esse desclocamento é compreendido através da introdução da alimentação utilizada, do tipo Y. Embora esse deslocamento exista, a frequencia de simulação continua atendendo os serviços de RFID e 5G. Além disso, analisando a curva de perda de retorno do *array* A_4 , identifica-se uma frequência de harmônico entre as duas frequências fundamentais. Essa frequência obedece a equação (2.9)

$$f_H = \left(\frac{f_2 - f_1}{2}\right) + f_2 \tag{2.9}$$

onde $f_1 e f_2$ correspondem às frequências inferior e superior do projeto, respectivamente.

Mediante a identificação da melhor frequência de operação através das curvas de perda de retono, é possível verificar o diagrama de irradiação simulado nessas frequências para cada um dos protótipos. As figuras 2.19 a 2.22 mostram esses diagramas.



Figura 2.19. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para *array* $A_1 \text{ com } (---) \phi = 0^\circ \text{ e}$ (----) $\phi = 90^\circ \text{ para: (a) } 3,53 \text{ GHz e (b) } 4,53 \text{ GHz.}$





Figura 2.21. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para *array* $A_3 \text{ com } (---) \phi = 0^\circ \text{ e}$ (----) $\phi = 90^\circ \text{ para:}$ (a) 3,48 GHz e (b) 4,62 GHz.



Figura 2.22. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para *array* A_4 com (---) $\phi=0^\circ$ e (.....) $\phi=90^\circ$ para: (a) 2,39 GHz e (b) 3,4 GHz.

Através da análise da perda de retorno e do diagrama de irradiação, é possível identificar o array A_4 como melhor par, pois se trata de um array mais diretivo que os demais.

2.7. Projeto de Array de antenas com quatro elementos

Para construção do projeto de *array* de quatro elementos, as antenas usadas como base foram os *arrays* de 2 elementos, vistos na seção 2.5. O objetivo era criar *arrays* de quatro elementos para os serviços de 5G e RFID, simultaneamente.

Da mesma maneira que no caso de 2 elementos, a separação dos elementos do *array* é $d_2 = 3 * d_1$, visando a não sobreposição dos pares e o tamanho do *array* compatível com as dimensões da placa impressa. A alimentação, nesse caso, foi feita através de uma linha de alimentação horizontal do tipo *microstrip*. Esse tipo de alimentação única é adotado, pois apresenta bom resultado de perda de retorno e, se a alimentação em Y fosse implementada, a dimensão do substrato seria maior que 30 cm, o que inviabilizaria a fabricação do protótipo.

Baseando-se nas informações expostas, foram projetados dois *arrays* desse tipo. O primeiro utilizando o *array* A_4 , que possui elementos iguais operando em frequências diferentes e, o segundo utilizando o *array* A_2 que possui elementos distintos na sua estrutura, como é visto através dos *layouts* na figura 2.23.



Figura 2.23. Layout dos arrays de 4 elementos, sendo (a) A₅: array de quatro elementos sendo todos elípticos; (b) A₆: array de quatro elementos, sendo pares de padrões retangular e elíptico.

As dimensões vistas na figura 2.23, d_1 , $d_2 e l_1$, são a distância entre os elementos do mesmo *array*, a distância entre os centros dos elementos dos *arrays* distintos e o comprimento, respectivamente. Essas dimensões são vistas na tabela 2.9.

Array/Dimensão	$d_1(cm)$	$d_2(cm)$	$l_1(cm)$	$l_2(cm)$
A ₅	4,285	12,855	11,315	3,125
A ₆	4,4115	13,2345	11,005	4,4115

Tabela 2.9. Dimensões em arrays de 4 elementos.

As curvas de perda de retono de cada um dos *arrays* simulados pode ser vista na figura 2.24, e o código desenvolvido é visto no Anexo D.



Figura 2.24. Resultados de perda de retorno simulado em para: (----) A₅ e (----) A₆.

Analisando os resultados de perda de retorno para os *arrays* de 4 elementos, identificase que no caso do *array* A_5 surgem frequências harmônicas que obedecem e equação (2.8). Em relação ao A_6 , a segunda frequência de projeto, 4,8 GHz, passa a ter uma perda de retorno inferior a 10 dB, o que indica irradiação não eficiente nessa frequência.

Mediante a identificação da melhor frequência de operação através das curvas de perda de retono, é possível verificar o diagrama de irradiação simulado nessas frequências para cada um dos protótipos. As figuras 2.25 e 2.26 mostram esses diagramas.



Figura 2.25. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para *array* $A_5 \text{ com } (---) \phi = 0^\circ \text{ e}$ (-----) $\phi = 90^\circ \text{ para:}$ (a) 2,85 GHz e (b) 3,30 GHz.



Figura 2.26. Resultados de Diagrama de Irradiação simulado para *array* $A_6 \text{ com } (---) \phi = 0^\circ \text{ e}$ (-----) $\phi = 90^\circ$ para 3,53 GHz.

Analisando os resultados de perda de retorno e diagrama de irradiação, é possível identificar o *array* A_5 como o melhor representante do modelo de 4 elementos.

2.8. Processo de Fabricação dos Arrays projetados

A fabricação dos modelos projetados e abordados nas seções 2.6 e 2.7 foi realizada no LaProp-UFF, utilizando-se a prototipadora LPKF S103 e o substrato FR-4.

Inicialmente, o projeto da antena deve ser exportado do *software* HFSS para o *software Circuit Pro*, que é o *software* da prototipadora. Posteriormente, configura-se a máquina com as características do substrato a ser utilizado na fabricação. Além disso, define-se o tipo de *layout* da fabricação. No caso deste projeto, o *layout* é *SingleSideTop*, uma vez que todo circuito da antena se localiza em uma única face do substrato. Após esses passos, a máquina começa sua operação e a figura 2.27 retrata esse momento.



Figura 2.27. Processo de fabricação dos *arrays* com a prototipadora LPKF s103.

Após a conclusão da etapa de fabricação com a prototipadora, os protótipos são submetidos à eliminação de cobre das partes indesejadas da sua estrutura. Para isso, a estrutura da antena e seu plano de terra são protegidos com uso de caneta permanente e esmalte da cor azul, além de uma camada de fita adesiva, como visto na figura 2.28. Feito isso, a antena é mergulhada em uma solução ácida de percloreto de ferro.



Figura 2.28. Processo de proteção da antena e seu plano de terra para conclusão da fabricação dos *arrays*.

Seguido esse procedimento, os pares dos protótipos estão aptos à última etapa, a conectorização. Nesta etapa, foram utilizados conectores de RF do tipo SMA soldados na linha de alimentação de cada *array* fabricado. Na figura 2.29, são vistas as antenas finalizadas e prontas para caracterização experimental através da medição da perda de retorno e do diagrama de irradiação.



Figura 2.29. Arrays fabricados para caracterização experimental.

Capítulo 3

Desenvolvimento do protótipo de medição usando Arduino

3.1. Introdução

Este capítulo compreende o desenvolvimento do protótipo de medição das antenas miniaturizadas, utilizando motor de passo controlado pelo *software* Arduino, sendo abordado tanto o projeto do circuito, quanto o desenvolvimento da lógica de controle.

Buscando a melhor compreensão, o projeto foi subdividido em quatro distintas etapas, sendo cada etapa correspondente às seções do presente capítulo, a saber: estudo dos tipos de motores de passo existentes; controle no nível de *hardware* equivalendo ao circuito elétrico de controle para conexão com Arduino; controle no nível de *software* correspondendo ao desenvolvimento da lógica de programação em linguagem compreendida pelo Arduino; e desenvolvimento e montagem do protótipo final apresentado neste trabalho.

3.2. Motor de Passo

O motor de passo é um dispositivo eletromecânico, que é capaz de transformar os impulsos elétricos recebidos em movimentos mecânicos, mediante a rotação do seu eixo [51]. Existem três tipos de motores de passo, sendo eles: motor de ímã permanente, motor de relutância variável e motor híbrido [53]. Cada um deles é caracterizado brevemente, a seguir:

• Motor de ímã permanente: Ele é composto por um rotor de ímã permanente ou magnetizado. A sua vantagem é a maior potência e torque na partida, uma vez que ele possui um campo magnético permanente que se soma ao campo magnético das bobinas. Por outro lado, sua desvantagem é a menor precisão. Esse motor é representado na figura 3.1 (a).

• Motor de relutância variável: Esse tipo de motor não possui um ímã permanente em seu rotor. É capaz de girar livremente quando o motor é energizado. A

consequência a ausência do ímã permanente, é sua falta de sensibilidade à polaridade da corrente. Além disso, o campo magnético total é igual ao campo magnético resultante do movimento das bobinas. Esse motor é representado na figura 3.1 (b).



Figura 3.1. Imagem do motor de passo do tipo (a) ímã permanente (b) relutância variável [53].

• Motor híbrido: Ele é composto pela junção da mecânica do motor de relutância variável com a potência do motor de ímã permanente. Desse modo, ele alia as melhores qualidades dos dois tipos, possuindo alto torque na partida e boa precisão. Esse motor é representado na figura 3.2.



Figura 3.2. Imagem do motor de passo do tipo híbrido [54].

Além da classificação em relação ao tipo, os motores de passo também são classificados quanto à existência ou não de derivação central nas bobinas que formam o enrolamento. Quanto à essa classificação, eles se dividem em dois grupos principais, os motores de passo unipolar ou bipolar [55], conforme é descrito a seguir:

• Unipolar: São motores com derivação central e que utilizam dois enrolamentos por fase, possuindo uma conexão em comum. Essa conexão é responsável por caracterizá-lo como unipolar de 5, 6 ou 8 contatos. No motor de 5 contatos, a conexão interna é soldada internamente, já no de 6 e 8 contatos a conexão em comum é separada. Esse tipo de motor, com suas respectivas conexões, pode ser visto na figura 3.3.



Figura 3.3. Imagem do motor de passo do tipo unipolar de (a) 6 (b) 5 e (c) 8 contatos [54].

• Bipolar: São motores que não apresentam derivação central em sua estrutura, por isso, as bobinas devem ser energizadas de modo que a corrente elétrica seja capaz de inverter seu sentido, mediante a utilização de um circuito de controle. Esse tipo de motor é ilustrado na figura 3.4.



Figura 3.4. Imagem do motor de passo do tipo bipolar [54].

Para o desenvolvimento deste trabalho, o modelo de motor de passo escolhido foi o motor hibrido, para que fosse possível aliar precisão e torque, de modo a obter um protótipo

robusto e preciso. Além disso, o motor escolhido é classificado como unipolar, a fim de aproveitar a existência da derivação central, eliminando a necessidade do desenvolvimento de um circuito de controle em paralelo para funcionar em conjunto com o motor.

Com isso, o modelo comercial de motor de passo escolhido foi o 28BYJ-48, como visto na figura 3.5. Esse modelo precisa de tensão de alimentação de 5V e ele é capaz de dar uma volta completa em 2048 passos.



Figura 3.5. Imagem do motor de passo adotado no projeto, modelo 28BYJ-48.

3.3. Controlando Motor de Passo e outros dispositivos com Arduino: Desenvolvimento do circuito elétrico

O projeto teve início com a montagem do circuito elétrico, para controle do motor de passo através da plataforma livre de prototipagem Arduino. Essa plataforma foi escolhida devido sua facilidade de manipulação e não gerar custos de licença de *software*, uma vez que a mesma é gratuita [54]. Dentre as diferentes placas de Arduino disponíveis no mercado, a escolhida foi a "Arduino Uno", pois ela possui os requisitos técnicos necessários para a implementação do projeto, como por exemplo: entradas digitais e analógicas, possibilidade de alimentação via fonte externa, conectividade USB e possibilidade de troca do microcontrolador, facilmente, em caso de problemas técnicos do mesmo [56].

A conexão do motor de passo com a placa de Arduino Uno é realizada através da utilização de um *driver* de controle capaz de suportar correntes de até 500 mA e queda de tensão de 1V, quando ligado. O *driver* ULN2003 atende a esses requisitos e, portanto, foi escolhido para ser utilizado no projeto do circuito.

O circuito elétrico de controle da rotação é montado a partir da ligação do motor de passo 28BYJ-48 com seu *driver* de controle, ULN2003. Para alimentação, o terminal de 5V do *driver* deve ser conectado ao terra (GND) da placa de Arduino, enquanto que o terminal de alimentação 12V (Vcc) do *driver* é conectado ao terminal de 5V da placa de Arduino, garantindo assim a polarização e alimentação do circuito. Posteriormente, as quatro entradas (*input*) do driver são conectadas a quatro portas digitais distintas do Arduino, permitindo, o controle do motor de passo através do Arduino, como é observado na figura 3.6.



Figura 3.6. Circuito elétrico representando a conexão do motor de passo, *driver* de controle e Arduino.

Para realizar o controle da rotação do motor, o módulo de controle/receptor infravermelho (IR) para Arduino é utilizado. Seu princípio de funcionamento baseia-se na emissão de uma sequência de pulsos luminosos através do LED infravermelho. Cada sequência enviada corresponde a um número de base hexadecimal distinto, que corresponde ao código da tecla pressionada [57]. O módulo I/R usado é ilustrado na figura 3.7.



Figura 3.7. Kit do módulo IR compatível com Arduino.

A conexão do módulo ao circuito consiste na interligação do Kit às entradas 5V, GND e uma porta digital, de escolha do usuário, da placa Arduino UNO, conforme visto na figura 3.8.



Figura 3.8. Conexão do Kit do módulo IR com Arduino Uno.

O display LCD 16x2 é empregado no projeto do circuito elétrico para viabilizar que o usuário saiba em que ângulo o motor de passo se encontra, dando maior interação entre o projeto e o usuário, com a possibilidade de mostrar até 32 caracteres. Esse display é escolhido devido sua alta aplicação em outros aparelhos elétricos e eletrônicos e baixo custo [58]. Para sua conexão com Arduino, é necessário seguir as conexões específicas determinadas pela ficha ténica do LCD, ou seja, algumas entradas do módulo já possuem as ligações prédeterminadas, conforme é visto na tabela 3.1.

Pino do Display LCD	Pino da plataforma Arduino		
1	GND		
2	5V		
3	GND		
4	Input (escolha do usuário)		
5	GND		
6	Input (escolha do usuário)		
7	Não Conoctado o nonhumo norte digital		
8	ou analógico do Arduino Uno		
9			
10			
11	Input (escolha do usuário)		
12	Input (escolha do usuário)		
13	Input (escolha do usuário)		
14	Input (escolha do usuário)		
15	5V		
16	GND		

Tabela 3.1. Correspondência das conexões entre display LCD 16x2 e Arduino Uno

Seguindo a tabela 3.1 e escolhendo as portas de entrada (*input*) que serão utilizadas, é possível conectar o *display* ao Arduino, como é visto na figura 3.9.



Figura 3.9. Conexão do módulo LCD 16x2 com Arduino Uno.

As figuras 3.6, 3.8 e 3.9 representam a conexão de cada um dos dispositivos, individualmente, a placa Arduino Uno, contudo, para a realização do projeto todos os 3 componentes devem operar simultaneamente. Com isso, foi testado o circuito elétrico dos 3 dispositivos simultaneamente e o esquemático do mesmo é ilustrado na figura 3.11.



Figura 3.10. Circuito elétrico final do protótipo proposto.

3.4. Controlando Motor de Passo e outros dispositivos com Arduino: Desenvolvimento da programação

Em paralelo ao desenvolvimento do projeto do circuito elétrico, descrito na seção anterior, foi elaborada a lógica de programação para controle do circuito com Arduino. A programação é feita no *software* Arduino IDE, e a estrutura lógica de programação se assemelha à linguagem de programação C++ [59]. O principal benefício em utilizar esse *"software"* é o fato de existirem diversas bibliotecas já disponíveis no mesmo como, por exemplo, códigos que possam ser utilizados com *displays*, sensores e outros componentes. Além dessas bibliotecas existentes, é possível baixar outras bibliotecas e adicioná-las à biblioteca natural do programa, para que possam ser utilizadas [60].

A programação na IDE do Arduino pode ser dividida em três partes: inclusão das bibliotecas, void *setup* e void *loop*. Na primeira parte, ocorre a inicialização das bibliotecas a serem utilizadas na implementação do projeto; na segunda, todas as variáveis devem ser inicializadas e, na terceira parte, é escrito o programa que ficará rodando indefinidamente ou até que haja uma interrupção provocada pelo usuário.

Como na seção anterior, cada elemento foi testado separadamente, portanto, a programação foi desenvolvida em quatro etapas, dentre as quais: controle do motor de passo, controle do módulo IR, controle do *display* LCD 16x2 e controle dos dispositivos, simultaneamente.

Para programação do motor de passo nessa plataforma, utiliza-se a biblioteca "Stepper". Ela nos permite controlar dois tipos de motores, sendo eles: unipolar ou bipolar. A principal função dessa biblioteca é a "myStepper". Ela é a responsável por controlar o motor do circuito desejado. Os parâmetros dessa função são: velocidade do motor e as entradas digitais que foram conectadas. A velocidade do motor corresponde à velocidade em que ele vai girar e sua unidade é rotações por minuto, enquanto que os pinos que foram conectados ao *driver* de controle do motor de passo correspondem às conexões realizadas entre o dispositivo e as portas digitais da placa. Para velocidade, utilizamos 100 RPM, ou seja, 100 rotações por minuto e o dispositivo foi conectado às portas 8, 9, 10 e 11 da placa, portanto, a função "myStepper" foi inicializada com esses parâmetros. A programação para a conexão do motor de passo pode ser vista no Anexo A.

Para controle do módulo receptor infra-vermelho, utiliza-se a biblioteca "*IRRemote*". Ela nos permite controlar e identificar a sequência hexadecimal correspondete a cada tecla do módulo I/R. O primeiro passo é a identificação de cada tecla através da função "*irrecv.decode*" de modo a compor a tabela 3.2, estipulando a correspondência das teclas com os códigos.

Tecla do Controle Remoto IR	Código Hexadecimal associado à tecla
1	FF6987
2	FF9867
3	FFB04F
4	FF30CF
5	FF18E7
6	FF7A85
7	FF10EF
8	FF38C7
9	FF5AA5
*	FF42BD
#	FF52AD
ok	FF02FD
•	FFA857
↑	FF629D
←	FF22DD
→	FFC23D

Tabela 3.2. Correspondência das teclas do módulo I/R e o código de identificação.

A lógica na utilização do controle consiste em: ao pressionar uma tecla previamente escolhida o motor gira no sentido horário, por outro lado, com outra tecla já escolhida ele rotaciona no sentido anti-horário. As teclas escolhidas foram a seta para direita (\rightarrow) associada ao sentido horário e a seta para esquerda (\leftarrow) para o sentido anti-horário. Se qualquer outra tecla da tabela 3.2 fosse pressionada, o motor não responderia ao comando. A programação para o controle do motor de passo através do controle, bem como a identificação das teclas podem ser vistas no Anexo B.

A biblioteca "LyquidCristal" é usada para controlar o display LCD 16x2. Para tal, é necessário informar as entradas usadas para conexão, como informado na tabela 3.1. Para interação com o usuário, a frase "Grau atual:" é informada a cada rotação do motor de passo informando em que ângulo ele se encontra. No Anexo C, é possível verificarmos o programa de controle do *display*.

Além do controle de cada elemento elétrico/eletrônico adotado no protótipo, a definição da variável de rotação se faz necessária. Ela consiste no passo de ângulo desejado

para o motor de passo, isto é, de quantos em quantos graus ele vai girar. No nosso caso, escolhemos que a rotação é realizada de 10 em 10 graus, pois com esses intervalos são tomadas amostras suficientes para serem utilizadas na segunda parte do projeto, medida da potência recebida por ângulo.

Essa variável é utilizada na função *"myStepper.step"*. Esta função não recebe o grau desejado diretamente como parâmetro, uma vez que o seu parâmetro pré-estabelecido é a quantidade de passos. Para que essa função entenda e execute a rotação desejada, é necessário realizar uma simples regra de três. Esse modelo de motor é capaz de realizar uma volta em 2048 passos, portanto, 360° correspondem a 2048 passos. Desse modo, a regra de três a ser feita pode ser representada pela equação:

$$N = \frac{(2048)*(\alpha)}{360} \tag{3.1}$$

Onde: N: número de passos

 α : ângulo de rotação desejado

Aplicando a equação (3.1) para o ângulo desejado de 10°, obtemos a quantidade de passos aproximadamente igual a 57. Para definir o sentido de rotação na lógica de programação, basta adicionar "+", caso o sentido seja horário e "-", caso o sentido seja anti-horário.

Com o controle de cada dispositivo estabelecido e a definição da variável de rotaçao estabelecida, é realizado o teste do funcionamento dos 3 dispositivos, simultaneamente, e o programa utilizado para controle do protótipo é observado no Anexo D.

3.5. Construção do protótipo final

O protótipo foi desenvolvido utlizando a plataforma Arduino Uno e os dispositivos display LCD 16x2, motor de passo e módulo de recepção I/R, como já descrito nas seções anteriores desse capítulo. Além disso, para a construçao física do protótipo, visto na figura 3.11, são usados materiais considerados isolantes. O isolante é escolhido devido suas características eletromagnéticas, pois elas dificultam a passagem de corrente elétrica [61], contribuindo para redução e/ou eliminação de qualquer interferência eletromagnética durante

a utilização na realização das medidas. Dentre os mateirais são utilizados: madeira, MDF (*Medium Density Fiberboard*) e canos de PVC (policloreto de vinila).



Figura 3.11. Protótipo final desenvolvido com Arduino Uno.

A madeira é utilizada como suporte para fixação da antena transmissora, com uma das extremidades conectadas ao motor de passo e a outra, ao rolamento. Sua altura total é de 30 cm. As placas de MDF são utilizadas para as partes superior, para fixar o motor de passo, e inferior, para uso do rolamento e do transferidor. O rolamento é implementado para facilitar o giro da haste de madeira usada na antena e o transferidor é usado como um método auxiliar de controle do ângulo atual da antena. Para conexão das partes superior e inferior e para conceder certa altura ao protótipo, o cano de PVC é adotado.

Ainda na figura 3.12, observa-se a presença de uma caixa de MDF usada para fixar a placa de Arduino Uno e o *driver* de controle do motor de passo. Essa caixa é criada para fixar esses componentes, evitando que haja interferência eletromagnética entre os componentes e as possíveis superfícies de contato. Além disso, essa caixa possibilita criar uma "caixa preta", de modo que o usuário não tenha contato com as ligações do circuito elétrico criado.

Capítulo 4

Automatização dos equipamentos

4.1. Introdução

Este capítulo compreende a pesquisa e a implementanção da automatização dos equipamentos usados no sistema de medição para caracterização das antenas através do *software* LabVIEWTM. Os equipamentos usados são o Gerador Vetorial de Sinal da Anritsu, modelo MG3700A, e o Analisador Vetorial de Sinal na função Analisador de Espectro, também da Anritsu, modelo MS2692A. Eles foram escolhidos por estarem disponíveis no LaProp e por atenderem à faixa de frequência das antenas projetadas e descritas no capítulo 02 deste trabalho.

O LabVIEWTM é uma plataforma de programação gráfica que se baseia no fluxo de dados [62]. Seu diferencial entre as demais plataformas de programação é o fato de apresentar uma programação bastante intuitiva e de fácil aprendizagem e assimilação, sua alta adequação à captura, tratamento e apresentação dos dados, além de ser uma plataforma *multitasking* (possibilidade de alternar entre tarefas) e *multithreaded* (execução de diversas tarefas em paralelo, dividindo o tempo de processamento) [63].

Com intuito de automatizar o sistema de medição e reduzir a possibilidade de interferência humana, cada equipamento foi conectado ao computador equipado do *software* de LabVIEWTM. As possibilidades de estabelecer a conexão eram através da interface *Ethernet* ou GPIB (*General Purpose Interface Bus*). A interface GPIB (*IEEE 48 Bus*) foi escolhida devido sua simplicidade, segurança e possibilidade de conexão de mais de um equipamento, caso haja necessidade [64]. A ligação dos equipamentos via interface GPIB é vista nas figuras 4.1 e 4.2.



Figura 4.1. Esquema representativo da conexão do gerador de sinal com o LabVIEWTM.



Figura 4.2. Esquema representativo da conexão do analisador de sinal com o LabVIEWTM.

Nas figuras 4.1 e 4.2 observa-se o bloco GPIB/USB-HS, que é o dispositivo de controle de equipamentos por barramento GPIB da *National Instruments* [65]. Através da extermidade USB, é realizada a conexão com o computador equipado com o LabVIEWTM e com a extremidade GPIB, a conexão com o gerador ou o analisador é realizada.

Nas seções seguintes, a conexão e controle de cada equipamento é abordado, além da explicação de dois projetos elaborados para realização de medidas, sendo um deles denominado de calibração e o outro denominado sistema de medição automático.
4.2. Gerador Vetorial de Sinais e conexão com LabVIEW

O gerador vetorial de sinal é um equipamento utilizado para gerar sinais de RF com a possibilidade de incluir diversos tipos de modulação, através de programação, como por exemplo: FM *(frequency modulation)*, AM *(amplitude modulation)*, OFDM *(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*. Nesse projeto, o modelo do gerador é visto na figura 4.3. Ele opera nas faixas de frequências compreendidas entre 250 kHz a 6 GHz [66].



Figura 4.3. Imagem do Gerador Vetorial de Sinal MG3700A da Anrtisu.

Para o controle desse equipamento, via interface GPIB/ LabVIEWTM, alguns comandos específicos precisam ser utilizados. Nesta aplicação, os comandos informados são: frequência de operação e potência do sinal gerado. Para o primeiro parâmetro, o comando usado é *FREQ*, enquanto que para o segundo, utiliza-se o comando *OLVL* [67]. O diagrama de blocos criado para controlar o gerador e a tela de interação são vistos nas figuras 4.4 e 4.5, respectivamente.

Na figura 4.4, o bloco identificado como 1é responsável por escrever a frequência no equipamento e o bloco 2, a potência de transmissão.



Figura 4.4. Diagrama de blocos desenvolvido para controle do gerador vetorial de sinal.



Figura 4.5. Front Panel do LabVIEW para controle do gerador vetorial de sinal.

4.3. Analisador de Sinal e conexão com LabVIEW

O analisador de sinal é um equipamento utilizado em duas funções distintas, que são: analisador de espectro ou medidor de potência (*power meter*). Na função analisador de espectro, é possível verificar os sinais presentes em uma determinada faixa de frequências escolhida e configurada previamente. Na segunda função, é possível verificar e medir a potência de sinais no ambiente. Como o objetivo é analisar o espectro e o sinal transmitido nas portadoras, a função utilizada é analisador de espectro. Nesta configuração, a verificação da recepção do sinal gerado e enviado com o uso do gerador de sinal. Nessa configuração (analisador de espectro) ele opera nas faixas de frequências compreendidas entre 50 Hz e 26,5 GHz [68].



Figura 4.6. Imagem do Analisador de Sinal MS2034A da Anrtisu.

Bem como no caso do gerador de sinal, o controle desse equipamento, via interface GPIB, requer o uso de alguns comandos específicos. Primeiramente, é escolhida a função de operação do equipamento, com o comando *INST SPECT*. Na nossa aplicação, os comandos informados são: frequência de operação e potência de pico na frequência de operação. Para o primeiro parâmetro, o comando usado é *FREQ:CENT*, enquanto para o segundo se utiliza o comando *MARK:MAX* [67]. O diagrama de blocos criado para controle do gerador é visto na figura 4.7 e a tela de interação do usuário é observada na figura 4.8.



Figura 4.7. Diagrama de blocos criado para controle do analisador vetorial de sinal.

Na figura 4.7, o bloco identificado como 1 é responsável por inicializar o equipamento na função desejada, nesse caso analisador de espectro. O bloco 2 escreve a frequência de operação no equipamento e o bloco 4 lê a potência de pico máxima. Para leitura correta, o bloco 3 é introduzido como contador de tempo entre os blocos 2 e 4. Os blocos 5 e 6 são responsáveis por escrever no *Front Panel* do LabVIEWTM a frequência e a potência de recepção, respectivamente.



Figura 4.8. *Front Panel* do LabVIEW para controle do analisador de sinal na função analisador de espectro.

4.4. Criação do programa Calibração no LabVIEW

O primeiro programa criado para automatização do sistema é o programa de calibração. O objetivo desse programa, é controlar automatica e simultanemente, os dois equipamentos. Para tal, ambos, gerador de sinal e analisador, devem ser conectados juntos ao dispositivo GPIB/USB-HS e, posteriormente, ao computador. Esse procedimento é ilustrado na figura 4.9.



Figura 4.9. Esquema Representativo da conexão simultânea do gerador e do analisador de sinal com o *Labview*.

Além do controle dos equipamentos, o programa calibração do LabVIEWTM é responsável por calibrar o sistema, revelando a potência recebida considerando os cabos e radiofrequência (RF) usados para conexão dos equipamentos. Na figura 4.10, é possível visualizar o fluxograma lógico do arquivo calibração.



Figura 4.10. Fluxograma da lógica do arquivo de calibração.

O valor de potência de recepção obtido com a execução do programa é chamado de $P_{calibração}$ e é utilizado para o cálculo do ganho das antenas. Esse procedimento é descrito no capítulo 5 adiante.

Vale ressaltar que os limites de frequência e potência de transmissão dos equipamentos devem ser respeitados, a fim de evitar problemas na execução do programa e/ou possíveis problemas aos equipamentos. A interface do programa é vista na figura 4.11



Figura 4.11. Front Panel do Arquivo de Calibração.

4.5. Criação do programa Sistema de Medição Automático no LabVIEW

O segundo programa criado para automatização do sistema é o programa de sistema de medição automático. O objetivo desse programa é adquirir e armazenar, automaticamente, os valores de potência de recepção, para posterior utilização, utilizando o *software* MATLAB[®] para construção dos diagramas de irradiação das antenas medidas.

A estrutura de conexão dos equipamentos é a mesma vista nas seções anteriores, e os parâmetros de entrada são os mesmos do programa da seção 4.3, isto é, potência de transmissão e frequência de operação. A distinção desse programa é na lógica de programação envolvida para captura das potências de recepção, que é vista no fluxograma da figura 4.12



Figura 4.12. Fluxograma da lógica do arquivo do sistema de medição automático.

Como é visto na figura 4.12, como entradas do programa surgem as variáveis: ângulo inicial (θ_0), ângulo final (θ_f) e passo de ângulo ($\Delta\theta$). O ângulo inicial e final correspondem às posições iniciais e finais do protótipo a ser medido: $\theta_0 = 0^\circ e \theta_f = 360^\circ$, pois é possível dar uma volta completa com o protótipo e caracterizá-lo em todas as regiões angulares do espaço. A variável passo de ângulo corresponde à variação angular da varredura, ou seja, de quantos em quantos graus as medidas são tomadas, nesse caso $\Delta\theta = 10^\circ$.

Em cada ângulo são tomados 5 níveis de potência de recepção para maior confiabilidade da medida em cada ângulo. O vetor Medida Atual mostra as medidas realizadas naquela posição angular com cada medida sendo tomada durante o tempo de varredura do equipamento, para um *spam* de 50 MHz. As medidas por ângulo compõem a tabela de Medidas do experimento. Paralelamente, essas medidas são processadas no MATLAB[®] para obtenção da potência média recebida entre os 5 valores representativa daquele ângulo, para composição da tabela Média das Medidas e que é salva em um arquivo com extensão .xls.

A interface gráfica para interação com o usuário via LabVIEW é vista na figura 4.13.



Figura 4.13. Front Panel do programa de Medições elaborado no LabVIEW.

4.6. Plotagem do Diagrama de Irradiação

Para plotagem do diagrama de irradiação, a tabela gerada e salva em excel com as médias das medidas por ângulo é utilizada. As mesmas variáveis angulares de incialização são usadas, isto é, o ângulo inicial, final e o passo de ângulo. O resultado plotado é normalizado, para tal, é necessário identificar a potência máxima recebida na medição e dividir todas as demais por esse valor tendo, assim, o máximo equivalente a 1, e as potências normalizadas, obtendo assim o vetor Medida = $\left(\frac{P_{medio(dBm)}}{P_{maximo}}, \theta\right)$, como é visto na representação genétrica da figura 4.14.



Figura 4.14. Diagrama de Irradiação genérico.

Vale ressaltar que, para esse procedimento, as potências devem estar na unidade de miliwatt e não dBm, portanto, essa transformação é feita no *script* do programa.

Os resultados são plotados na forma retangular e polar. Para representação na primeira forma, o vetor de medidas por ângulo é reorganizado de modo a variação ficar de -180° a 180°, pois o vetor esta organizado, inicialmente, de 0° a 360°. Esse rearranjo é feito, pois a medida em 350° é equivalente a -10°, 340° corresponde a -20° e assim por diante. Para representação na forma polar, a função polar é utilizada.

A apresentação dos resultados é feita comparando os dados medidos e simulados. Para tal os resultados simulados são transformados de medida de campo elétrico, fornecida pelo *software* HFSS, para medida de potência.

O código desenvolvido para plotagem dos diagramas é visto no Anexo I.

Capítulo 5

Resultados: Protótipo de Arrays de 2 e 4 elementos

5.1. Introdução

Neste capítulo, é realizada a caracterização prática dos *arrays* de antenas fabricados e apresentados no capítulo 2. Essa caracterização ocorre através da análise da perda de retorno, VSWR e do diagrama de irradiação. O capítulo foi subdividido em mais quatro seções, a saber: análise dos resultados de perda de retorno; apresentação do sistema de medição; resultados do diagrama de irradiação e cálculo do ganho dos *arrays*.

5.2. Análise da Perda de Retorno

Como mencionada no capítulo 2, a perda de retorno ou parâmetro s_{11} , é considerada como um parâmetro de desempenho da antena. Para identificar a melhor frequência de operação da antena, esse parâmetro deve ser avaliado, e, quanto menor for o valor, melhor é o funcionamento da antena. Em geral, as frequências que apresentam s_{11} abaixo de -10 dB são consideradas as de melhor funcionamento da antena, com apenas 10% da potência sendo refletida no terminal de entrada da antena.

A medição da perda de retorno dos *arrays* é realizada com o analisador de rede vetorial modelo PNA-L N5231A da fabricante *Keysight Technologies* disponível no Insituto de Pesquisa da Marinha (IPqM). Antes da realização das medidas, o equipamento foi calibrado segundo as recomendações do fabricante e os resultados obtidos na medição são comparados aos simulados. Essa comparação é vista na figura 5.1 para o caso de *arrays* de 2 elementos e na figura 5.2, para o caso de 4 elementos. O código Matlab é dado no Anexo J.



Figura 5.1. Comparação entre as curvas de Perda de Retorno medida (---) e simulada (----) para os casos: (a) protótipo A₁; (b) protótipo A₂; (c) protótipo A₃; (d) protótipo A₄.



Figura 5.2. Comparação entre as curvas de Perda de Retorno medida (-)-e simulada (-)para os casos: (a) protótipo A₅; (b) protótipo A₆.

As diferenças entre os resultados medidos e simulados apresentados nas figuras 5.1 e 5.2 podem ser justificados pela conectorização, uma vez que os conectores SMA utilizados não foram modelados e aplicados na simulação das antenas. Ainda com base nos resultados apresentados nas figuras 5.1 e 5.2, é possível identificar as melhores frequências de operação das antenas desenvolvidas e, consequentemente, a taxa de onda estacionária em cada uma das portadoras. Esses resultados são organizados e agrupados na tabela 5.1.

Array	Frequência (GHz)	Perda de Retorno (dB)	VSWR
	2,595 (F_h)	-19,11	1,24
<i>A</i> ₁	3,420 (<i>F_p</i>)	-11,56	1,699
	4,875 (<i>F_p</i>)	-21,73	1,175
A_2	3,595 (<i>F_p</i>)	-11,31	1,756
	4,665 (<i>F</i> _p)	-10,98	1,7
	2,875 (<i>F_h</i>)	-32,12	1,139
A_3	3,490 (<i>F</i> _p)	-10,20	1,501
	4,735 (<i>F</i> _p)	-25,91	1,110
	2,505 (<i>F_p</i>)	-15,77	1,392
A_4	3,400 (<i>F_p</i>)	-32,70	1,286
	4,735 (<i>F_h</i>)	-16,77	1,339
	2,890 (<i>F</i> _p)	-21,50	1,20
A_5	3,440 (<i>F</i> _p)	-26,30	1,09
	4,600 (<i>F_h</i>)	-28,94	1,07
	2,475 (<i>F_h</i>)	-11,66	1,65
A ₆	3,625 (<i>F</i> _p)	-26,02	1,25
	4,790 (<i>F</i> _p)	-16,01	1,17

Tabela 5.1. Resumo da Perda de Retorno e VSWR experimental de cada *array* onde $\mathbf{F}_{\mathbf{h}:}$ frequência harmônico e $\mathbf{F}_{\mathbf{p}:}$ frequência de projeto.

Ainda analisando as figuras 5.1 e 5.2, é possível determinar a largura de banda em cada frequência de operação da antena. Para tal, foi adotado o limiar de s_{11} < -10 dB. Os dados de largura de banda podem ser vistos na tabela 5.2.

Array	Frequência (GHz)	Largura de Banda Simulada (MHz)	Largura de Banda Medida (MHz)
	2,595 (<i>F_h</i>)		39
<i>A</i> ₁	3,420 (<i>F</i> _p)	88	72
	4,875 (<i>F</i> _p)	39	53
<i>A</i> ₂	3,595 (<i>F_p</i>)	30	38
	4,665 (<i>F_p</i>)	39	33
	2,875 (<i>F_h</i>)		39
A_3	3,490 (<i>F_p</i>)	45	22
	4,735 (<i>F</i> _p)	190	205
	2,505 (<i>F_p</i>)	52	33
A_4	3,400 (<i>F</i> _p)	41	52
	4,735 (<i>F_h</i>)	103	95
	2,890 (<i>F</i> _p)	55	36
A_5	3,440 (<i>F</i> _p)	115	67
	4,600 (<i>F_h</i>)	195	113
	2,475 (<i>F_h</i>)		93
A ₆	3,625 (<i>F</i> _p)	118	100
	4,790 (<i>F</i> _p)		125

Tabela 2. Largura de Banda Simulada e Medida para cada array.

Na tabela 5.2 é possível identificar alguns espaços sem largura de banda simulada. Esse fenômeno acontece, pois nessas frequências não existe o limiar de -10 dB adotado neste trabalho, o que inviabiliza a determinação da largura de banda para essas frequências.

5.3. Sistema de Medição

Para realizar as medições de potência recebida para determinação do diagrama de irradiação, um *setup* de medição foi construído, como apresentado no capítulo 3, com a utilização do protótipo com Arduino e do sistema automatizado de medição. Esse *setup* conta com o gerador de sinal para transmissão do sinal e o analisador de espectro para recepção do sinal.

Um par de *arrays* de mesmo modelo é usado, sendo um colocado na estrutura com Arduino e, posteriormente, conectada ao gerador para transmissão de um sinal na portadora de funcionamento da antena. A outra antena do par é conectada ao analisador para verificação da potência recebida. Esse *setup* criado pode ser exemplificado através da figura 5.3.



Figura 5.3. Diagrama de blocos do Setup de medição usado no LaProp/UFF.

O parâmetro d, visto na figura 5.3, é a distância mínima entre os elementos transmissor e receptor para que eles estejam na região de campo distante. No caso de antenas miniaturizadas, essa distância está relacionada ao comprimento de onda (λ) referente à frequência de operação [69] como é visto na equação (5.1). Como cada *array* opera em duas ou três portadoras distintas, o cálculo é feito levando em conta a menor frequência de operação, pois nesse caso, é garantido que para as outras frequências as antenas estejam na região de campo distante. Os parâmetros d adotados para cada *array* são vistos na tabela 5.3.

$$d = 10 * \lambda \tag{5.1}$$

Tabela 5.3. Distâncias Mínimas de campo distante para cada array.

Parâmetros	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
Região de Campo distante (cm)	117.60	83.30	85.71	120.00	125.00	85.71

Utilizando o *setup* descrito, o procedimento de medição consiste na introdução da antena transmissora no protótipo equipado com motor de passo controlado por Arduino. O motor foi programado para rotação de 0° a 360° com passo angular de 10°, de modo a caracterizar a antena em todas as regiões do espaço. Com essa configuração, são contabilizados 37 ângulos ou posições de medição diferentes. A antena transmissora foi rotacionada de 0° a 360°, de 10 em 10 graus, ficando inerte em cada posição por cerca de 90 segundos para estabilização do sinal. Através do analisador de espectro são tomadas e registradas cinco medidas de potência recebida pela antena receptora, através da função *Peak Search*.

Esses valores são registrados no programa LabVIEW desenvolvido e explicado no capítulo 03, resultando na tabela Medidas contendo 6 colunas e 38 linhas, sendo cada linha uma posição angular distinta e cada coluna um nível de potência recebido naquela posição. A média dessas medidas é calculada através do MATLAB[®] com o código que se encontra no Anexo E e criando uma tabela .xls contendo duas colunas e trinta e sete linhas, sendo a primeira coluna a posição angular e a segunda, a média das cinco medidas registradas e cada linha equivalendo a um ângulo de medição.

Para gerar o diagrama de irradiação, a média das medidas em cada posição angular é calculada utilizando um código desenvolvido usando o MATLAB[®], que se encontra no Anexo F. O código acessa a planilha de medição, converte os valores médios, obtidos em dBm, para miliwatts, e os normaliza [70]. Em seguida, o gráfico retangular e polar daquela medida é gerado com base nos valores normalizados, através da função *plot* e *polar*, respectivamente. Neste mesmo código, um trecho para geração da curva do diagrama de irradiação simulado é inserido com o objetivo de possibilitar melhor avaliação comparativa entre os resultados obtidos por simulação e medição. A partir da simulação realizada no HFSS, exportam-se os valores simulados e os dois resultados são plotados simultaneamente. Desta forma, ao final de todas as medições realizadas, para cada par de antena, foi gerado um gráfico comparativo, na forma retangular e polar, apresentando as curvas de diagrama de irradiação medido e simulado para o par de antenas.

O sistema, com as características descritas, é montado no LaProp na UFF, um ambiente real e que é suscetível a fenômeno do multipercurso. A fim de minimizar esse

fenômeno, o material absorvedor é usado em determinados pontos do ambiente, como é visto na figura 5.4.



Figura 5.4. Sistema de Medição implementado no LaProp/UFF.

Utilizando esse sistema de medição, duas medidas são tomadas para o diagrama de irradiação de cada *array*, a saber: os pares de *array* na horizontal para medição do diagrama na condição em que $\phi = 0^\circ$ e a segunda condição em que os *arrays* se encontram na vertical para condição de $\phi = 90^\circ$.

5.4. Resultados de Diagrama de Irradiação

Para cada *array*, são obtidos e apresentados quatro resultados em cada frequência de medição, sendo: diagrama na forma retangular e polar para $\phi = 0^{\circ}$ e para $\phi = 90^{\circ}$, configurando dois resultados para cada uma dessas configurações. Para cada figura, o resultado simulado é representado por (– -) e o resultado medido por (—). As figuras 5.5 a 5.7 apresentam esses resultados para o *array* A_1 .



Figura 5.5. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A_1 na frequência de 2,55 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$; (c) retangular para $\phi = 90^\circ$; (d) retangular para $\phi = 90^\circ$.



Figura 5.6. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₁ na frequência de 3,4 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.7. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₁ na frequência de 4,8 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.

Os resultados das figuras 5.8 e 5.9 apresentam a comparação dos resultados medidos e simulados para o *array* A_2 .



Figura 5.8. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A_2 na frequência de 3,6 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.9. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A_2 na frequência de 4,655 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$; (c) retangular para $\phi = 90^\circ$; (d) retangular para $\phi = 90^\circ$.



As figuras 5.10 a 5.12 apresentam a comparação dos resultados medidos e simulados para o *array* A_3 .

Figura 5.10. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₃ na frequência de 2,87 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.11. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₃ na frequência de 3,48 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.12. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A_3 na frequência de 4,735 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$; (c) retangular para $\phi = 90^\circ$; (d) retangular para $\phi = 90^\circ$.



As figuras 5.13 a 5.15 apresentam a comparação dos resultados medidos e simulados para o *array* A_4 .

Figura 5.13. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A_4 na frequência de 2,5 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$; (c) retangular para $\phi = 90^\circ$; (d) retangular para $\phi = 90^\circ$.



Figura 5.14. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₄ na frequência de 3,38 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.15. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A_4 na frequência de 4,730 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$; (c) retangular para $\phi = 90^\circ$; (d) retangular para $\phi = 90^\circ$.



As figuras 5.16 a 5.18 apresentam a comparação dos resultados medidos e simulados



Figura 5.16. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₅ na frequência de 2,5 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.17. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₅ na frequência de 3,54 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.18. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₅ na frequência de 4,6 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



A comparação para o array A_6 é observada nas figuras 5.19 a 5.21.

Figura 5.19. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₆ na frequência de 2,85 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.20. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₆ na frequência de 3,43 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^{\circ}$; (b) polar para $\phi = 0^{\circ}$; (c) retangular para $\phi = 90^{\circ}$; (d) retangular para $\phi = 90^{\circ}$.



Figura 5.21. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A_6 na frequência de 4,89 GHz nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$; (c) retangular para $\phi = 90^\circ$; (d) retangular para $\phi = 90^\circ$.

Em alguns resultados, mostrados nas figuras 5.5 a 5.21, é possível perceber diferenças entre os resultados obtidos na medição e na simulação. Elas podem ser entendidas e explicadas devido à utilização dos cabos e conectores de RF que acrescentam perdas aos sistemas, a sensibilidade no processo de alinhamento das antenas transmissora e receptora, e as reflexões existentes no ambiente.

5.5. Resultados de Diagrama de Irradiação: Câmara Anecóica

Para avaliar os resultados obtidos na sessão 5.3 para os diagramas de irradiação em um ambiente real e validar o protótipo de medição, duas medidas foram realizadas na câmara anecóica do IPqM, ambiente ideal para caracterização de protótipos de antenas e *arrays*. Para

caracterização nesse ambiente, a antena transmissora era do tipo corneta e a antena receptora é o array desenvolvido no trabalho.

Os modelos escolhidos foram os que apresentaram melhores resultados de perda de retorno medidos, a saber: $A_4 \, e \, A_6$. Além disso, o primeiro modelo é escolhido como prova de conceito dos *arrays* de dois elementos e, o segundo, para os de 4 elementos. Os resultados das medições na câmara são mostrados tanto para o *array* A_4 , na figura 5.22, e para o A_6 , na figura 5.23, juntamente com os resultados simulado e em ambiente real.



Figura 5.22. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A_4 na frequência de 2,5 GHz, sendo(----) resultado simulado, (----) resultado medido em ambiente real e (----) resultado medido na câmara anecóica nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$.



Figura 5.23. Resultados de Diagrama de Irradiação do *array* A₆ na frequência de 3,43 GHz, sendo(----) resultado simulado, (----) resultado medido em ambiente real e (---) resultado medido na câmara anecóica nas formas: (a) retangular para $\phi = 0^\circ$; (b) polar para $\phi = 0^\circ$

Analisando os resultados representados nas figuras 5.22 e 5.23, nota-se uma boa similaridade entre as três curvas.

5.6. Cálculo do Ganho e Largura de Feixes de Meia Potência e Entre Nulos

Para avaliar o ganho das antenas foi adotado o mesmo *setup* de medição da figura 5.4. A medição do ganho das antenas, em dB, foi realizada utilizando-se a equação (5.2), baseada na equação de *Friis*, onde todas as variáveis do *setup* de medição foram consideradas, conforme equação (5.3) [71].

$$P_{rx} = P_{calibrac\tilde{a}o} + G_{Tx(0^0)} - L_{ambiente} + G_{Rx(0^0)}$$
(5.2)
Onde: $P_{calibração} - \acute{e}$ o resultado potência do sinal transmitido no eixo principal (ângulo = 0°) com as perdas nos cabos (Tx e Rx) e conectores de RF utilizados;

 $G_{Tx(0^0)}$ – ganho da antena de transmissão;

 $L_{ambiente}$ – atenuação provocada no sinal pelo ambiente de medição;

 $G_{RX(0^0)}$ – ganho da antena receptora, a qual se deseja caracterizar;

 P_{RX} – potência do sinal recebido no eixo principal (ângulo = 0°).

Na equação (5.2), todas as variáveis são conhecidas, calculadas, ou possíveis de serem medidas isoladamente, exceto o ganho das antenas de transmissão e recepção. Geralmente, nos sistemas de medição de antenas, são utilizadas antenas de referência com ganho isotrópico (dBi) conhecido no transmissor, permanecendo, desta forma, apenas uma incógnita a ser calculada: o ganho da antena receptora. Contudo, no sistema de medidas apresentado neste trabalho, não há uma antena de referência posicionada no transmissor. Verificou-se, então, que a aplicação desta equação é possível utilizando-se um par de antenas idênticas, de modo que a antena de referência seja igual à antena transmissora [72]. Desta forma, as variáveis $G_{Tx(0^0)}$ e $G_{Rx(0^0)}$ são iguais e é possível reescrever a equação (5.2), obtendo a equação (5.3).

$$P_{rx} = P_{calibração} + 2 * G_{Antena(0^0)} - L_{ambiente}$$
(5.3)

onde: $G_{Antena(0^0)}$ - é o ganho de cada antena utilizada, transmissão e recepção.

Para aplicar a equação (5.3) e determinar o ganho de cada antena, é necessário calcular ou determinar cada uma das outras variáveis da equação. A seguir, cada variável é analisada, sendo detalhando procedimento adotado para obtenção do seu valor:

Potência de Calibração (P_{calibração})

A potência de calibração é obtida através da execução do programa LabVIEW "calibração" descrito no capítulo 4. Ela considera a potência de transmissão inserida no gerador e todos os cabos usados no sistema, tanto na transmissão quanto na recepção. Todos os cabos do *setup* são conectados e as extremidades são ligadas ao gerador e ao analisador de espectro. Dessa forma, a potência lida no analisador e dada como output do programa é $P_{calibracão}$ de acordo com a figura 5.24.



Figura 5.24. Diagrama de Blocos representativo da medida da P_{calibração}

• Perda no ambiente (*L_{ambiente}*)

Para melhor dimensionar a perda no ambiente, alguns modelos de propagação foram utilizados, como por exemplo: *Floating intercept* (FI) e *Close-in* (CI), contudo, os resultados obtidos com esses modelos foram próximos a perda no espaço livre, portanto ela foi adotada considerando as antenas de transmissão e recepção na região de campo distante. Dessa forma a perda no ambiente é calculada através da perda do espaço livre, descrita pela equação (5.4).

$$L_{ambiente} = 32,44 + 20 * \log(f_{MHz}) + 20 * \log(d_{km})$$
(5.4)

onde f é a frequência de transmissão, em MHz, e d é a distância entre as antenas de transmissão e recepção, em km.

• Potência de Recepção (P_{RX(ang0°)})

O valor da potência de recepção, por sua vez, é obtido quando as antenas de transmissão e recepção estão alinhadas no eixo principal (ângulo = 0°), e posicionadas na região de campo distante. Nesta configuração, registra-se o valor de potência de pico obtido na leitura do analisador de espectro.

Os resultados obtidos para cada um desses parâmetros para cálculo do ganho, bem como o ganho real e o ganho simulado no *software* HFSS para cada antena é visualizado nas tabelas 5.4 a 5.9, para cada *array* individualmente.

Frequência/Parâmetro	P _{calibração(dBm})	L _{ambiente (dB)}	$P_{RX(ang0^{\circ})(dBm)}$	$G_{medido(dB)}$	G _{simulado(dB)}
2,55 GHz	10,10	45,82	76,27	10,175	10,23
3,4 GHz	26,12	48,31	62,14	6,145	7,027
4,8 GHz	39,89	53,63	82,98	5,27	5,31

Tabela 5.4. Ganho medido para o array A_1

Tabela 5.5. Ganho medido para o array A_2

Frequência/Parâmetro	$P_{calibra c ilde{a} o(dBm)}$	L _{ambiente (dB)}	$P_{RX(ang0^{\circ})(dBm)}$	$G_{medido(dB)}$	G _{simulado(dB)}
3,6 GHz	39,04	48,82	100,20	6,17	6,94
4,655 GHz	62,18	62,18	113,61	7,06	7,91

Tabela 5.6. Ganho medido para o array A₃

Frequência/Parâmetro	P _{calibração(dBm)}	L _{ambiente (dB)}	$P_{RX(ang0^\circ)(dBm)}$	$G_{medido(dB)}$	G _{simulado(dB)}
2,87 GHz	24,57	49,13	78,48	2,39	1,34
3,48 GHz	25,39	50,81	62,08	7,06	7,21
4,735 GHz	52,39	53,48	88,13	6,735	6,89

Tabela 5.7. Ganho medido para o array A_4

Frequência/Parâmetro	$P_{calibra c ilde{a} o(dBm)}$	Lambiente (dB)	$P_{RX(ang0^\circ)(dBm)}$	$G_{medido(dB)}$	G _{simulado(dB)}
2,5 GHz	10,10	45,74	62,17	3,165	1,43
3,38 GHz	56,96	48,36	78,87	13,22	13,40
4,730 GHz	58,16	53,47	94,97	8,33	8,43

Tabela 5.8. Ganho medido para o array A₅

Frequência/Parâmetro	P _{calibração(dBm)}	Lambiente (dB)	$P_{RX(ang0^{\circ})(dBm)}$	$G_{medido(dB)}$	G _{simulado(dB)}
2,5 GHz	31,29	45,61	61,88	7,86	8,00
3,54 GHz	26,03	48,63	103,80	14,57	14,73
4,6 GHz	52,40	53,23	100,75	2,44	2,82

Frequência/Parâmetro	P _{calibração(dBm)}	L _{ambiente (dB)}	$P_{RX(ang0^{\circ})(dBm)}$	G _{medido(dB)}	G _{simulado(dB)}
2,85 GHz	19,01	46,59	81,33	7,91	8,01
3,43 GHz	24,53	48,20	92,25	9,76	10,20
4,89 GHz	56,83	53,76	92,41	9,09	9,51

Tabela 5.9. Ganho medido para o array A_6

Através da comparação entre os ganhos medidos e simulados, é possível verificar que os valores estão muito próximos com erro médio de 4%. Os casos em que o ganho medido é maior que o simulado é entendido pelo fato de que essa frequência, na simulação, possui perda de retorno melhor.

Para determinação da largura de feixe, é realizada a análise dos diagramas de irradiação, na forma retangular ou polar, obtidos para cada um dos *arrays*. Os resultados obtidos na simulação e na medição são vistos na s tabelas 5.10 e 5.11.

Array	Frequência (GHz)	BW ₃ Simulado	BW ₃ Medido para	BW ₃ Simulado para	BW ₃ Medido para
		para Φ = 0°	Φ = 0°	Φ = 0°	Φ = 0°
	2,595 (<i>F_h</i>)	90°	70°	30°	40°
<i>A</i> ₁	3,420 (<i>F</i> _p)	70°	40°	70°	40°
	4,875 (<i>F</i> _p)	60°	40°	70°	70°
A_2	3,595 (<i>F</i> _p)	60°	50°	70°	30°
	4,665 (<i>F_p</i>)	50°	40°	20°	20°
	2,875 (<i>F_h</i>)	60°	50°	70°	40°
<i>A</i> ₃	3,490 (<i>F</i> _p)	70°	70°	90°	60°
	4,735 (<i>F</i> _p)	70°	50°	40°	30°
	2,505 (<i>F_p</i>)	80°	50°	100°	90°
<i>A</i> ₄	3,400 (<i>F</i> _p)	40°	30°	40°	30°
	4,735 (<i>F_h</i>)	70°	40°	30°	30°
	2,890 (<i>F</i> _p)	30°	50°	90°	100°
A_5	3,440 (<i>F</i> _p)	30°	50°	40°	40°
	4,600 (<i>F_h</i>)	20°	10°	20°	10°
	2,475 (<i>F_h</i>)	60°	60°	30°	30°
A ₆	3,625 (<i>F</i> _p)	20°	20°	40°	30°
	4,790 (<i>F</i> _p)	20°	30°	30°	30°

Tabela 10. Resultados Medidos e Simulados para Largura de Feixe de Meia Potência

Array	Frequency (GHz)	Simulated FNBW	Measured FNBW	Simulated FNBW	Measured FNBW
		for Φ = 0°	for Φ = 0°	for Φ = 0°	for Φ = 0°
	2,595 (F_h)	210°	200°	180°	170°
A_1	3,420 (<i>F_p</i>)	260°	180°	260°	230°
	4,875 (F _p)	300°	160°	340°	290°
<i>A</i> ₂	3,595 (<i>F</i> _p)	200°	180°	320°	240°
	4,665 (<i>F</i> _p)	290°	170°	240°	210°
	2,875 (<i>F_h</i>)	300°	210°	340°	350°
<i>A</i> ₃	3,490 (<i>F</i> _p)	240°	210°	320°	240°
	4,735 (<i>F</i> _p)	290°	240°	280°	240°
	2,505 (<i>F_p</i>)	250°	180°	340°	190°
<i>A</i> ₄	3,400 (<i>F</i> _p)	300°	280°	300°	280°
	4,735 (<i>F_h</i>)	340°	250°	310°	270°
	2,890 (<i>F</i> _p)	210°	150°	290°	150°
A_5	3,440 (<i>F</i> _p)	220°	160°	270°	250°
	4,600 (<i>F_h</i>)	310°	250°	270°	230°
	2,475 (<i>F_h</i>)	300°	250°	290°	160°
A ₆	3,625 (<i>F</i> _p)	140°	130°	320°	240°
	4,790 (<i>F</i> _p)	210°	150°	250°	190°

Tabela 11. Resultados Medidos e Simulados para Largura de Feixe entre Nulos

Através da análise da tabela 5.10, verifica-se uma similaridade entre os valores medidos e simulados, com distinções de 30°, no pior caso. No caso da largura de feixe entre nulos vista na tabela 5.11 a discrepância entre os valores é maior, o que já era esperado, uma vez que os resultados simulados para o diagrama de irradiação possuem uma maior abertura do que os medidos.

Capítulo 6

Conclusão

A concepção e o desenvolvimento do protótipo proposto foi concluída integralmente, conforme planejado, observando-se o objetivo principal inicial.

Obteve-se *arrays* de 2 e 4 elementos com geometrias similares e distintas operando em 2 ou 3 frequências diferentes (*dual-band* ou *tri-band*, respectivamente), de modo a atender dois serviços diferentes: RFID e 5G. Esses *arrays* apresentam boa perda de retorno nas frequências de operação, portanto, são candidatos a aplicações nos respectivos serviços e possibilitam uma única antena transmissora ou receptora para transmissões integradas de RFID e 5G.

Além disso, um protótipo de medição de diagrama de irradiação de antenas miniaturizadas automático e de baixo custo é desenvolvido com êxito. Essas duas características principais são alcançadas através da utilização do LabVIEW, Matlab e do Arduino.

Como legado do projeto, obteve-se uma infraestrutura montada e um procedimento de teste desenvolvido, que podem ser aplicados na caracterização de antenas miniaturizadas de 1, 2, 4 e até mesmo mais elementos irradiantes em sua estrutura, com dimensões máximas de 30 cm.

6.1. Análise dos Resultados

Analisando-se os resultados obtidos na medição do protótipo, apresentados no capítulo 5, alguns pontos podem ser destacados:

É possível confirmar que o dimensionamento das caixas de ar, implementado na simulação das antenas no HFSS, deve ser tal que a distância de suas arestas às faces da antena deve ser efetivamente maior ou igual a λ_{máx}/4 (λ_{máx} sendo o comprimento de onda para a menor frequência) [73];

- Os resultados medido e simulado mostraram o mesmo comportamento em relação à Relação Frente-Costas (RFC), lóbulo principal, lóbulos secundários, e os valores máximos e mínimos se encontram nas mesmas posições angulares, com pequenas divergências;
- As poucas divergências observadas nos gráficos das curvas comparativas de simulação e medição, podem ser compreendidos de duas maneiras, a saber: dificuldade em alinhar as antenas transmissora e receptora durante o processo de medição e, principalmente, o ambiente de medição não ser ideal e possibilitar reflexões do sinal transmitido. Acredita-se, ainda, que há um aumento do impacto dos efeitos de multipercurso, reflexão e *scattering* em frequências mais altas;
- Os resultados medidos em ambiente real e ambiente ideal, câmara anecóica, foram bem próximos, o que revela: mesmo que o ambiente de medição não seja o ideal, os resultados são válidos e certifica a contribuição científica da técnica de medição proposta neste trabalho;
- Verifica-se, ainda, no processo de medição e cálculo do ganho das antenas, que há uma similaridade grande entre os valores obtidos na simulação e na medida real. Em algumas frequências, observa-se o ganho medido maior que o simulado e esse fenômeno pode ser explicado através da análise da perda de retorno, uma vez que nessas frequências, o valor medido de perda de retorno também foi melhor que o simulado.
- Os modelos de *arrays* de antenas apresentam diferentes elementos de irradiação nas frequências, o que também é um fator inovador desta pesquisa. Os resultados medidos e simulados validam esta técnica de *array* banda dupla ou tripla para elementos distintos.

6.2. Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, pretende-se:

- Estudar e desenvolver antena com *patch* elíptico e casador de ^λ/₄ em sua estrutura, a fim de criar *array* de 2 e 4 elementos com esse elemento e, posteriormente, medição e análise do diagrama de irradiação;
- Desenvolver um sistema de transmissão e recepção *full-duplex* nas portadoras do RFID e do 5G, utilizando os *arrays* desenvolvidos;
- Caracterização real do substrato utilizado, de modo a verificar os parâmetros de permissidade elétrica e tangente de perdas e incluí-los no projeto dos arrays, a fim de verificar melhoria entre os resultados simulados e medidos dos parâmetros das antenas;
- Projeto e Construção de uma mini câmara anecóica para caracterização dos protótipos de *array* desenvolvidos.

Referências

- [1] Carneiro, F. Os 7 blocos fundamentais de um sistema de comunicação e conceitos de funcionamento. Disponível em: . Acesso em: 12/07/2019.">https://eletronicaqui.com/2016/05/sistema-decomunicacao/>.
- [2] Blackman, C., Forge, S. 5G Deployment: State of Play in Europe, USA and Asia. Disponível em: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2019/631060/IPOL_IDA(2019)631060_EN.pdf>. Acesso em: 12/07/2019.
- [3] Vora, L. J. Evolution of Mobile Generation Technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G. International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, vol. 02, issue 10, 2015.
- [4] Mota, V. L. G., Carvalho, R., Correa, C., Di Renna, R. B., Magri, V., Ferreira, T., Castellanos, P., Matos, L. Evolução da Tecnologia de telefonia móvel e estudo e caracterização de um sistema móvel 5G de quinta geração. Engevista, vol. 21, nº 1, 2019.
- [5] Di Renna, R. B. Antenas SIWG impressas com fendas e alimentação do tipo *stripline* para aplicações *indoor* no padrão 5G. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ, 2017.
- [6] O que é RFID? Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/grad/07_1/rfid/RFID_arquivos/o%20que%20e.htm>. Acesso em: 12/07/2019.
- [7] RFID: Identificação por Radio Frequência. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/grad/12_1/rfid/links/o_que_e.html>. Acesso em: 12/07/2019.
- [8] Barros, A. Das guerras ao mercado intelignete: A história do RFID no mundo. Disponível em: < http://cabtec.com.br/historia-rfid>. Acesso em: 12/07/2019.
- [9] Lima, L. Da II Guerra Mundial ao Supermercado Inteligente: A história do RFID no mundo. Disponível em: http://www.cabtecgti.com.br/blog/rfid/2014/06/da-iia-guerra-mundial-ao-supermercado-inteligente-historia-rfid-mundo/. Acesso em: 12/07/2019.
- [10] Ribeiro, P. C. C., Da Silva, N. S. B., Freitas, K. F. Adoção de RFID na gestão de estoques e na prevenção de perdas em lojas de varejo. XIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT), Resende, RJ, 2016.
- [11] Kim, Y. T., Kim, E. J., Shin, J. M., Bae, S. C., Son, K. Y., et al. "Refrigerator for managing food by using RFID". *European Patent Office*.

- [12] Farooq, U., Hasan, M., Amar, M., Hanif, A., Asad, M. U. "RFID Based Security and Access Control System", 2013 International Journal of Engineering and Technology (IACSIT), vol. 6, n°4, 2014.
- [13] Zhang, B. B., Yang, Q., Wang, H. Y., Li, J. C. "Realization of China mlitary RFID air interface protocol based on software-defined radio". 11th *International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, Xian, CH, 2012.
- [14] Sposito, R. Pedágio 2.0. Disponível em:
 https://exame.abril.com.br/tecnologia/pedagio-2-0-m0126066/# Acesso em: 12/07/2019.
- [15] Bilsk, P., Modelski, J., Kosciug, B., Olejnik, J., Badaczewska, I., Malamou, A., Makri, R. "Application of the RFID technology in the European Union border control system". *IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA)*, Warsaw, Polônia, 2017.
- [16] Jebali, C., Kouki, A. "A proposed prototype for cattle monitoring system using RFID". *International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC)*, Ottawa, 2018.
- [17] Silveira G. Você sabia que o bilhete único utiliza a tecnologia RFID? Disponível em: < https://rfidbrasil.com/blog/bilhete-unico-com-rfid/>. Acesso em: 12/07/2019.
- [18] Constantine, A. B. Teoria de Antenas: Análise e Síntese. 3 edição, editora LTC.
- [19] Tipos de antenas e suas propriedades. Disponível em: < http://www.transtelconti.com.br/pdf/cursoantenas/curso_cap2.pdf>. Acesso em: 12/07/2019.
- [20] Pozar, D. M. e Schaubert ,D. H. Microstrip Antenna: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays, IEEE Press, New York, 1995..
- [21] Garg, R., Bhartia , P., Bahl, I. e Ittipiboon, A. Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House, Boston, 2001
- [22] Wong, K. Compact and Broadband Microstrip Antennas. Wiley, 2002.
- [23] James, J. R. e Hall, P. S. Handbook of Microstrip Antennas. Londres, UK: Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [24] Silva Neto, V. P. Caracterização de Circuitos Planares de Micro-Ondas pelo Método Iterativo das Ondas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2013.

- [25] Barra, T. V. e Von Zuben, F. J. Um Ambiente Evolutivo para Apoio ao Projeto de Antenas de Microfita, Dissertação de Mestrado, Unicamp, Campinas, SP, 2007.
- [26] Da Silva, P. L. Modelagem de Superfícies Seletivas de Frequência e Antenas de Microfita utilizando Redes Neurais Artificiais, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2006.
- [27] Nasimuddin, X. Qing, Z. N. Che. Compact Asymmetric-Slit Microstrip Antennas for Circular Polarization. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 59, pp. 285-288, No. 1, Janeiro 2011
- [28] Sadiku, M. N. O. Elementos do Eletromagnetismo, 3a. Ed., Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [29] R. E. Collin, Foundations for Microwave Engineering, 2 Ed., Wiley, 2001.
- [30] Ribero ,J. M., Kossiavas, G., Staraj, R e Fond, E. "Dual-Frequency Antenna Circularly Polarized for GPS-SDARS Operation". *2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Edimburgo, UK, 2007.
- [31] Antennas Arrays (Phased Arrays). Disponível em: http://www.antenna-theory.com/arrays/main.php>. Acesso em: 12/07/2019.
- [32] Antenna Theory- Antenna Arrays. Disponível em: https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_arrays.htm>. Acesso em: 12/07/2019.
- [33] VALE, Eduardo Rodrigues. Antenas- Teoria e Aplicações. Rio de Janeiro: Publit.
- [34] "Cámara anecoica de antenas más moderna de Europa entra en servicio". Schwarz magazine.
- [35] BEER, S., ZWICK, T., "Probe-based radiation pattern measurements for highly integrated millimeter-wave antennas,"*in Proc. of the European Conference on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, pp. 1–5, April 2010.
- [36] ZWICK, T., et. al., "Probe Based MMW Antenna Measurement Setup," in Proc. of IEEE Antennas and Propagation International Symposium, Monterrey, USA, pp. 747– 750, June 2004.
- [37] Cajo ,R., Godoy, C., Romero, J., Bosquez, C. e Huilcapi, V. "Novel Method to Calculate Antenna Radiation Patterns based on Fixed-line-of-sight setting". 27th IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communication and Electronic Systems (COMCAS), Tel-Aviv, Israel, 2017.

- [38] Ortega, A. "Antenna Performance Evaluation Through the Lobular Radiation Pattern". *IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*. Bali Island, Indonesia.
- [39] Taygur , M.M. et al.: "Low-Cost FPGA Based Antenna Pattern Measurement System". *International Conference on Applied Electronics*.
- [40] Zwick, T., Baks, C., Pfeiffer, U. R., Liu, D., Gaucher, B. P. "Probe based MMW Antenna Measurement Setup". *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*.
- [41] Hazan, N., Sapuan, S. Z., Sayegh, A. M., Jenu, Z. M., Nasimuddin: "A Portable Measurement System for Antenna's Radiation Pattern". *IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017.
- [42] RFID: Funcionamento. Disponível em:< https://www.gta.ufrj.br/grad/12_1/rfid/links/funcionamento.html>. Acesso em: 15/07/2019.
- [43] Qual frequência RFID é adequada para sua aplicação? Disponível em:< https://www.asiarfid.com/rfid-basics/which-rfid-frequency-is-right-for-your-applicationpt.html>. Acesso em: 15/07/2019.
- [44] J. Wang, G. Li, B. Huang, Q. Miao, J. Fang, P. Li, H. Tan, W. Li, J. Ding, J. Li and Y. Wang. *Spectrum Analysis and Regulations for 5G*. 5G Mobile Communications.
- [45] CANALTECH. Anatel define as primeiras frequências para instalação do 5G no Brasil. Disponível em:<https://canaltech.com.br/telecom/anatel-define-as-primeirasfrequencias-para-instalacao-de-5g-no-brasil-140101/>. Acesso em:15/07/2019.
- [46] Fernandes, E. M. F. Aplicação se superfície seletiva em frequência para melhoria de desempenho de sistemas de antenas tipo banda dupla. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2016.
- [47] Da Silveira, R. V. L., Da Silva, S. G. "Um estudo teórico sobre o uso das antenas de microfita", *III CONEDU- Congresso Nacional de Educação*, Natal, RN, 2016.
- [48] Balanis, C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley Sons, 1997.
- [49] Kumar G. Broadband Microstrip Antennas. Artech House Publishers, 2003.
- [50] Correa, F. S. Linhas de Transmissão Planares. Disponível em:< https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4116567/mod_resource/content/4/5%20-%20Linhas%20de%20transmissao%20planares%20-%20PSI3483%20-%202017.pdf>. Acesso em: 16/07/2019.

- [51] Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas em IEEE Std 145-2013 (Revisão de IEEE Std 145-1993), pp.1-50, March 6 2014
- [52] Recomendação ITU-R M.2101-0. Modeling and Simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies, 2017. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2101-0-201702-I!!PDF-E.pdf>. Acesso em: 20/08/2019.
- [53] NEOMOTION.Datasheet de Produtos: Motores de Passo. Disponível em: < https://www.neomotion.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Cat%C3%A1logo-Datasheet-dos-motores-de-passo-R01.pdf>. Acesso em: 13/07/2019.
- [54] MECNET, Pj.Tutorial Motor de Passo Parte 1: Introdução, Tipos, Modos de Acionamento. Disponível em: < http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-sobremotor-de-passo >. Acesso em: 13/07/2019
- [55] BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vinicius Puga de Almeida. Motor de Passo. Disponível em:< https://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.p df>. Acesso em: 13/07/2019.
- [56] THOMSEM, A. O que é Arduino? Disponível em: https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino/. Acesso em:13/07/2019.
- [57] MADEIRA, D. Controle Remoto e Módulo Receptor Infravermelho com Arduino. Disponível em:< https://portal.vidadesilicio.com.br/controle-remoto-e-modulo-receptorinfravermelho/>. Acesso em: 13/07/2019.
- [58] PUHLMANN, H. F. W. Módulo de display LCD. Disponível em: < https://www.embarcados.com.br/modulo-de-display-lcd/ >. Acesso em:13/07/2019.
- [59] CHAVIER, L. F. Programação para Arduino- Primeiros Passos. Disponível em: https://www.circuitar.com.br/tutoriais/programacao-para-arduino-primeiros-passos/. Acesso em:13/07/2019.
- [60] STRAUB, M. G. Como programar Arduino- Uma introdução ao software Arduino. Diponível em:<https://www.usinainfo.com.br/blog/como-programar-arduino-umaintroducao-ao-software-arduino/>. Acesso em:13/07/2019.
- [61] Brasil Escola. Condutores e Isolantes. Disponível em:< https://brasilescola.uol.com.br/fisica/condutores-isolantes.htm>. Acesso em:14/07/2019.
- [62] National Instruments. O que é Labview? Disponível em: https://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html. Acesso em:14/07/2019

- [63] DZIALOSZYNSKI, B. S. Intodução à programação em ambiente Labview. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2015.
- [64] What is GPIB/IEEE 48 Bus? Disponível em:<https://www.electronicsnotes.com/articles/test-methods/gpib-ieee-488-bus/what-is-gpib-ieee488.php>. Acesso em: 14/07/2019.
- [65] GPIB Hardware Installation Guide and Specifications: GPIB Hardware. Disponível em: < http://www.ni.com/pdf/manuals/370426r.pdf>. Acesso em: 15/07/2019.
- [66] Anritsu. Vector Signal Generator: MG3700A. Disponível em:<https://www.anritsu.com/en-US/test-measurement/products/mg3700a>. Acesso em: 14/07/2019.
- [67] DATASHEET. Generator Signal Vector. Disponível em:<https://dl.cdnanritsu.com/en-au/test-measurement/files/Manuals/Operation-Manual/MG3700A_main_opm_e_19_0.pdf> Acesso em:14/07/2019.
- [68] Anritsu. Vector Signal Generator: MG3700A. Disponível em:< https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms2692a>. Acesso em: 14/07/2019.
- [69] Rodriguez, V., "Basic Rules for Anechoic Chamber Design, Part One: RF Absorber Approximations". *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. vol 58, issue 6.
- [70] Antennas. Disponível em:< http://www.eng.auburn.edu/~mikeb/Antennas/Antennas.ppt>. Acesso em:18/072019.
- [71] Rappaport, T. *Wireless Communications Principles and Practice*, 2^a ed., Prentice Hall, 1995.
- [72] Park, J., Mun, G., Yu, D., Lee, B., Kim, W. N. "Proposal of Simple Reference Antenna Method for EMI Antenna Calibration", *Electromagnetic Compatibility (EMC),IEEE International Symposium*, Long Beach, USA, 2001.
- [73] Brigss, L. S. Estudo, caracterização e aplicação de antenas Vivaldi em célula *phased array* de banda larga. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2019.

Anexo A

Algoritmo para plotagem da perda de retorno para *patch* retangular

```
٥،
clear all
close all
% Perda de Retorno
%Retangular 3,4 com casador
s11 ret34comcasador = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul_trabalhos\Dissertação\Dissertacao_VITOR MOTA\DISSERTAÇÃO
\ANTENA 3 4 GHZ comcasador\perdaderetorno matlab.xlsx','E2:E202');
%Retangular 4,8 com casador
s11 ret48comcasador = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Dissertacao VITOR MOTA\DISSERTAÇÃO
\ANTENA 4 8 GHZ comcasador\perdaderetorno matlab.xlsx','E2:E302');
%Retangular 3,4 sem casador
s11 ret34semcasador = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Dissertacao VITOR MOTA\DISSERTAÇÃO
\ANTENA 3 4 GHZ Ssemcasador\perdaderetorno matlab.xlsx','E2:E202');
freq1 = 2*10^9:0.01*10^9:4*10^9;
freq2 = 2*10^9:0.01*10^9:5*10^9;
%PLOTANDO AS FIGURAS de PERDA DE RETORNO do modelo retangular
figure(1)%plotando a perda retorno da antena 01
plot (freq1,s11 ret34comcasador,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (freq2,s11 ret48comcasador,'k-
.', 'LineWidth',2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11(dB)'), title ('Perda
de Retorno')
plot (freq1,s11 ret34semcasador, 'b--', 'LineWidth',2)
hold off
```

Anexo B

Algoritmo para plotagem da perda de retorno para *patch* elíptico

```
oʻs______
clear all
close all
% Perda de Retorno
%eliptico 3,4 com casador
s11 eli24semcasador = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Dissertacao VITOR MOTA\DISSERTAÇÃO
\ANTENA ELIP 2 4 GHZ\perdaderetornomatlab.xlsx','E2:E177');
%eliptico 4,8 com casador
s11 eli35semcasador = xlsread('C:\Users\vitor
luiz/Desktop/Facul trabalhos/Dissertação/Dissertação VITOR MOTA/DISSERTAÇÃO
\ANTENA_ELIP_3_5_GHZ\perdaderetornomatlab.xlsx','E2:E302');
%eliptico 3,4 sem casador
s11 eli48semcasador = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Dissertacao VITOR MOTA\DISSERTAÇÃO
\ANTENA_ELIP_4_8_GHZ\perda_retorno.xlsx','E2:E201');
freq1 = 1.75*10^9:0.01*10^9:3.5*10^9;
freq2 = 1.75 \times 10^9: ((4 \times 10^9 - 1.75 \times 10^9)/128): 4 \times 10^9;
freq3 = 2.4*10^{9}:((6.5*10^{9}-2.4*10^{9})/199):6.5*10^{9};
%PLOTANDO AS FIGURAS de PERDA DE RETORNO do modelo retangular
figure(1)%plotando a perda retorno da antena 01
plot (freq1,s11 eli24semcasador, 'r', 'LineWidth',2)
hold on
plot (freq2,s11 eli35semcasador, 'k-
.', 'LineWidth',2), xlabel('frequência(GHz)'), ylabel('s11(dB)'), title('Perda
de Retorno')
plot (freq3,s11 eli48semcasador, 'b--', 'LineWidth',2)
hold off
```

Anexo C

Algoritmo para plotagem da perda de retorno para *array* com 2 elementos

```
oʻc_____
clear all
close all
% Perda de Retorno
%caso01
s11 caso01 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz/Desktop/Facul_trabalhos/Dissertação/Dissertação_VITOR_MOTA/DISSERTAÇÃO
\caso01\perda retorno caso01.xlsx','E2:E502');
%caso02
s11 caso02 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Dissertacao VITOR MOTA\DISSERTAÇÃO
\caso02\perda retorno caso02.xlsx','E2:E502');
%caso03
s11 caso03 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul_trabalhos\Dissertação\Dissertacao VITOR MOTA\DISSERTAÇÃO
\caso03\perda retorno caso03.xlsx','E2:E502');
%caso04
s11 caso04 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz/Desktop/Facul trabalhos/Dissertação/Dissertação VITOR MOTA/DISSERTAÇÃO
\caso04\perda retorno caso04.xlsx','E2:E502');
%variação de frequência
freq1 = 1.*10^9:0.01*10^9:6*10^9;
%PLOTANDO AS FIGURAS de PERDA DE RETORNO do array 2 elementos
figure(1)%plotando a perda retorno da antena 01 e 02
plot (freq1,s11 caso01,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (freq1,s11 caso02,'k-
.', 'LineWidth', 2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11 (dB)'), title ('Perda
de Retorno')
hold off
figure(2)%plotando a perda retorno da antena 03 e 04
plot (freq1,s11 caso03,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (freq1,s11 caso04,'k-
.', 'LineWidth', 2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11(dB)'), title ('Perda
de Retorno')
hold off
```

Anexo D

Algoritmo para plotagem da perda de retorno para *array* com 4 elementos

```
oʻc _____
clear all
close all
% Perda de Retorno
%caso05
s11 caso05 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul_trabalhos\Dissertação\Dissertacao_VITOR_MOTA\DISSERTAÇÃO
\caso05\perda retorno caso05.xlsx','E2:E502');
%caso06
s11 caso06 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul_trabalhos\Dissertação\Dissertacao_VITOR_MOTA\DISSERTAÇÃO
\caso06\perda_retorno_caso06.xlsx','E2:E502');
%variação de frequência
freq1 = 1.*10^{9}:0.01*10^{9}:6*10^{9};
%PLOTANDO AS FIGURAS de PERDA DE RETORNO do modelo array 4 elementos
figure(1)%plotando a perda retorno da antena 5 e 6
plot (freq1,s11_caso05,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (freq1,s11_caso06,'k-
.', 'LineWidth',2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11(dB)'), title ('Perda
de Retorno')
hold off
```

Anexo E

Algoritmo para controle do motor de passo via Arduino

8-----

/*Motor de passo: vai converter os impulsos elétricos

* em movimentos mecânicos. As relações físicas/elétricas são:

* i)Sequencia dos impulsos --> Direção de rotação

* ii) Frequência dos impulsos --> Velocidade de rotação

* iii) Numero de impulsos --> O quanto vai rotacionar

#include <Stepper.h> //Biblioteca usada para controlar o motor de passo

```
int velocidade_inicial_motor = 100; //unidade é rotações por minuto (RPM)
int angulo_grau = 10; //angulo de rotaçao do motor de passo
int i; //variavel usada no for
int revela_angulo; // o que vai mostrar na Serial Monitor
//int angulo = ((angulo_grau)*2048)/360; //resultado da regra de três que eu vou usar pra movimentar o motor
//int voltas = 360/angulo_grau; //numero de voltas que o motor de passo vai dar
```

Stepper myStepper (velocidade_inicial_motor,8,9,10,11); // essa é a maneira que inicializo a função

```
void setup() {
  myStepper.setSpeed (velocidade_inicial_motor);//
  Serial.begin(9600); //taxa de transmissao para a serial monitor
```

}

```
void loop() {
   for (int i = 1; i <= voltas; i++) {
    myStepper.step(+56.88);//rotação no sentido horario
   revela_angulo = i*10;
   Serial.print (" O grau atual do motor de passo eh "); //so para ver na serial monitor
   Serial.println (revela_angulo);
   delay(1000);
  }
}</pre>
```

^{*/}

Anexo F

Algoritmo para controle do módulo I/R via Arduino

8-----

#include <IRremote.h>

int RECV_PIN = 13; int led = 5; float armazenavalor;

```
IRrecv irrecv(RECV_PIN); decode_results results;
```

```
void setup()
{
   Serial.begin(9600);
   irrecv.enableIRIn(); // Inicializa o receptor IR
   pinMode(led,OUTPUT);
}
```

```
void loop() {
```

if (irrecv.decode(&results)) { //identificando as teclas do controle

```
Serial.print("Valor lido : ");
Serial.println(results.value,HEX);
armazenavalor = (results.value);
irrecv.resume(); //Le o próximo valor
}
```

Anexo G

Algoritmo para controle do *display* LCD via Arduino

§_____

//incluindo as bilbiotecas necessarias

#include <LiquidCrystal.h> //biblioteca usada para o LCD

//definindo onde vou conectar os pinos

LiquidCrystal lcd(8, 7, 5, 4, 6, 2); //definição da conexado do LCD com as portas do Arduino

//Inicio da estrutura do Codigo na linguagem do Arudino

void setup() {
 pinMode (fechadura,OUTPUT);
 lcd.begin(16,2); //define a quantidade de linhas e colunas do LCD a ser utilizado
 Serial.begin(9600); //estabelecer e começar a comunicação
 SPI.begin (); //inicio o SPI
 Serial.println("Teste display!!");

Anexo H

Algoritmo para controle do *display* LCD via Arduino

/*Motor de passo: vai converter os impulsos elétricos

* em movimentos mecânicos. As relações físicas/elétricas são:

* i)Sequencia dos impulsos --> Direção de rotação

* ii) Frequência dos impulsos --> Velocidade de rotação

* iii) Numero de impulsos --> O quanto vai rotacionar

*/

#include<SPI.h> //biblioteca usada para os microcontroladores se comunicarem com os perifericos
#include <Stepper.h> //Biblioteca usada para controlar o motor de passo
#include <LiquidCrystal.h> //biblioteca usada para o LCD
#include <IRremote.h>

§_____

int RECV_PIN = 13; //botão do arduino ue liguei o controle int velocidade_inicial_motor = 100 ; //unidade é rotações por minuto (RPM) //int angulo_grau = 10; //angulo de rotaçao do motor de passo //int voltas = 36; // numero de voltas é 360/x, sendo x o passo do angulo desejado int botao=3; //declarando o pino do botão para ligar o motor de passo int var = 0; //valor que vai dizer se o botão foi apertado ou não int var2 = 0; // contar quantas vezes apertei o botão int revela_angulo; // o que vai mostrar na Serial Monitor LiquidCrystal lcd(2,3,5,4,6,7); //definição da conexado do LCD com as portas do Arduino: tem que ser na ordem que foi feita a conexão da portas do Arduino com o display LCD float armazenavalor; IRrecv irrecv(RECV_PIN); decode_results results;

Stepper myStepper (velocidade_inicial_motor,8,9,10,11); // essa é a maneira que inicializo a função do motor de passo

void setup() { myStepper.setSpeed (velocidade inicial motor); Serial.begin(9600); //taxa de transmissao para a serial monitor //pinMode (botao,INPUT); irrecv.enableIRIn(); // Inicializa o receptor IR lcd.begin(16,2); //define a quantidade de linhas e colunas do LCD a ser utilizado lcd.print("Grau atual:0 "); } void loop() { //var = digitalRead(botao); //se o botão for pressionado,a variavel auxiliar var passa a valer 1 if (irrecv.decode(&results)) {//identificando as teclas do controle armazenavalor = (results.value); switch (results.value){ case 16761405: //quando pressiono o botao da direita do meu controle remoto (transformei de hexadecimal para decimal)/ lcd.clear(); lcd.print("Grau atual:");

myStepper.step(-57);//rotação no sentido anti horario de 10 em 10 graus. Esse valor é obtido pela regra de três (x = (2048 * graus)/360)

var2++; // vou incrementando a variavel auxiliar 2 toda vez que eu apertar o botão

revela_angulo = (var2*10); //vai "calcular" essa expressão de 0 à 360, contando de 10 em 10 (porque eu quis que fosse de 10 em 10) toda vez que eu apertar o botão

```
lcd.print(revela_angulo);
```

case 16720605: //quando pressiono o botao da esquerda do meu controle remoto (transformei de hexadecimal para decimal)/

lcd.clear();

lcd.print("Grau atual:");

myStepper.step(-57);//rotação no sentido anti horario de 10 em 10 graus. Esse valor é obtido pela regra de três (x = (2048 * graus)/360)

var2++; // vou incrementando a variavel auxiliar 2 toda vez que eu apertar o botão

revela_angulo = (-1*var2*10); //vai "calcular" essa expressão de 0 à 360, contando de 10 em 10 (porque eu quis que fosse de 10 em 10) toda vez que eu apertar o botão

lcd.print(revela_angulo);

break;

}
irrecv.resume(); //Le o próximo valor

```
}
```

}

Anexo I

Módulo para plotagem do diagrama de irradiação

o^c_____

```
clear all
close all
%Dados do diagrama de radição simulados do caso 6
%Frequência de 2.85 GHz HORIZONTAL (phi = 0)
diagrama simulado horizontal polar = [0.356522623537439 0.29789998994245
0.32195499940797 0.534495524624063 0.788347434069286 0.960086568900082
0.981446885396959 0.880892132071648 0.737969688150621 0.61998390642052
0.559778057073858 0.549798233905407 0.531061671592502 0.407166735050843
0.166465108284397 0.303663403217574 0.405259316713719 0.179419653321743
0.28959480739996 0.28959480739996 0.338844116071393 0.132692634177114
0.310315732683877 0.349958282355276 0.282872798564911 0.365922236854252
0.484950529526102 0.565801782860904 0.642393380672687 0.749032466862056
0.88291885700441 0.991685293002511 1 0.915195435908071 0.860907962838793
0.778204452827236 0.539522321484754];
diagrama horizontal_polar =
diagrama simulado horizontal polar.^2;%transforma de campo para potência
% O vetor das medidas polar tem que ser organizado de O a 360 (significa
% colocar de 0 a 180 e depois de -180 a -10 para compor o vetor)
diagrama simulado horizontal = [0.28959480739996 0.338844116071393
0.132692634177114 0.310315732683877 0.349958282355276 0.282872798564911
0.365922236854252 0.484950529526102 0.565801782860904 0.642393380672687
0.749032466862056 0.88291885700441 0.991685293002511 1 0.915195435908071
0.860907962838793 0.778204452827236 0.539522321484754 0.356522623537439
0.29789998994245 0.32195499940797 0.534495524624063 0.788347434069286
0.960086568900082 0.981446885396959 0.880892132071648 0.737969688150621
0.61998390642052 0.559778057073858 0.549798233905407 0.531061671592502
0.407166735050843 0.166465108284397 0.303663403217574 0.405259316713719
0.179419653321743 0.28959480739996];
%Frequência de 2.85 GHz VERTICAL (phi = 90)
diagrama_simulado_vertical_polar = [0.516533036489153 0.496473248565766
0.847818539329445 1 0.960667208194751 0.8014495738099 0.603993188035298
0.425887026997165 0.293631586279552 0.210748568615642 0.166725828548346
0.144921640927255 0.135058274648289 0.140255055555789 0.161084004629052
0.17770649386105 0.167011377990153 0.13198431464138 0.120607859392451
0.120607859392451 0.152612926476041 0.172604788605687 0.156749097235574
0.120664343552277 0.0950801727093613 0.0933117024129053 0.101598688039806
0.117158879066097 0.156627158973709 0.23788937549859 0.368583787519435
0.544623370108419 0.742078056981535 0.908064144936124 0.965332056112471
0.8411198661125 0.516533036489153];
diagrama vertical polar = diagrama simulado horizontal polar.^2;%transforma
de campo para potência
% O vetor das medidas polar tem que ser organizado de O a 360 (significa
```

% colocar de 0 a 180 e depois de -180 a -10 para compor o vetor)

diagrama_simulado_vertical = [0.120607859392451 0.152612926476041 0.172604788605687 0.156749097235574 0.120664343552277 0.0950801727093613 0.0933117024129053 0.101598688039806 0.117158879066097 0.156627158973709 0.23788937549859 0.368583787519435 0.544623370108419 0.742078056981535 0.908064144936124 0.965332056112471 0.8411198661125 0.516533036489153 0.148481358612361 0.496473248565766 0.847818539329445 1 0.960667208194751 0.8014495738099 0.603993188035298 0.425887026997165 0.293631586279552 0.210748568615642 0.166725828548346 0.144921640927255 0.135058274648289 0.140255055555789 0.161084004629052 0.17770649386105 0.167011377990153 0.13198431464138 0.120607859392451];

%Frequência de 3.43 GHz HORIZONTAL (phi = 0)

diagrama_simulado_horizontal_polar_freq2 = [1 0.734317573432867 0.241892513699411 0.502962655449334 0.582518273714968 0.432557627074379 0.253466717342161 0.149308497913811 0.115345875282701 0.101258839451001 0.0860785290983422 0.0672270210021507 0.046087815866661 0.035912595488165 0.0408374006361916 0.0473013014571627 0.0437748940779237 0.1386481207527 0.207327482777484 0.207327482777484 0.133725187475708 0.0650424900605623 0.110517091842832 0.0809601317311204 0.0363243457181096 0.0456656887852109 0.0534443175561247 0.0494949327039696 0.0521187437235961 0.0734540863701841 0.124071099544312 0.230344872461663 0.403533326858297 0.572999746708032 0.549187103820165 0.747317921356909 1]; diagrama horizontal polar freq2 = (diagrama simulado horizontal polar freq2).^2;%transforma de campo para potência % O vetor das medidas polar tem que ser organizado de O a 360 (significa % colocar de 0 a 180 e depois de -180 a -10 para compor o vetor) diagrama simulado horizontal freq2 = [0.207327482777484 0.133725187475708 0.0650424900605623 0.110517091842832 0.0809601317311204 0.0363243457181096 0.0456656887852109 0.0534443175561247 0.0494949327039696 0.0521187437235961 0.0734540863701841 0.124071099544312 0.230344872461663 0.403533326858297 0.572999746708032 0.549187103820165 0.247317921356909 0.64077747482951 1 0.734317573432867 0.241892513699411 0.502962655449334 0.582518273714968

0.432557627074379 0.253466717342161 0.149308497913811 0.115345875282701 0.101258839451001 0.0860785290983422 0.0672270210021507 0.046087815866661 0.035912595488165 0.0408374006361916 0.0473013014571627 0.0437748940779237 0.1386481207527 0.207327482777484];

%Frequência de 3.43 GHz VERTICAL (phi = 90)

diagrama_simulado_vertical_polar_freq2 = [0.851673469096553 0.827716386322779 0.878585828158497 0.975346073165195 1 0.914681249972012 0.756926742152892 0.580765762785591 0.42295788990943 0.299772437409005 0.22043781731985 0.197973130559601 0.225046982366603 0.259668497126903 0.257867985379691 0.194202980483898 0.0922918034190481 0.112792082992807 0.176575316496156 0.176575316496156 0.16278817375376 0.123525783889319 0.162664652031381 0.215698505958174 0.231502625600957 0.22298087964932 0.2187036157112 0.236946208424138 0.28035935610414 0.347070095548128 0.434496635006546 0.532295524871349 0.61856431580589 0.673779931634785 0.712006957014028 0.774429276345621 0.851673469096553]; diagrama_vertical_polar_freq2 = diagrama_simulado_vertical_polar_freq2.^2;

diagrama_simulado_vertical_freq2 = [0.176575316496156 0.16278817375376 0.123525783889319 0.162664652031381 0.215698505958174 0.231502625600957 0.22298087964932 0.2187036157112 0.236946208424138 0.28035935610414 0.347070095548128 0.434496635006546 0.532295524871349 0.61856431580589 0.673779931634785 0.712006957014028 0.774429276345621 0.843195960382485 0.851673469096553 0.827716386322779 0.878585828158497 0.975346073165195 1 0.914681249972012 0.756926742152892 0.580765762785591 0.42295788990943 0.299772437409005 0.22043781731985 0.197973130559601 0.225046982366603 0.259668497126903 0.257867985379691 0.194202980483898 0.0922918034190481 0.112792082992807 0.176575316496156];

%Frequência de 4.8 GHz HORIZONTAL (phi = 0)

diagrama_simulado_horizontal_polar_freq3 = [1 0.419891582436411 0.524620241414386 0.676736353177203 0.236683608502671 0.35400471045823 0.503291822900089 0.407733494634069 0.257577319438968 0.142131076169297 0.0790949283066111 0.108683976343115 0.173481782611518 0.159293363886064 0.0747027656666475 0.124515279199915 0.078310708203609 0.0821590571738844 0.167111919585 0.167111919585 0.0822385060018319 0.0992680169933147 0.104343022744292 0.0833682488820984 0.0750687589473802 0.158913572752021 0.150422633958147 0.145995640020751 0.189870334377591 0.279157335195873 0.394536597204593 0.428358425855474 0.218132078540056 0.296604305400643 0.592857833843323 0.423237543214253 1]; diagrama_horizontal_polar_freq3 = (diagrama_simulado_horizontal_polar_freq3).^2;%transforma de campo para potência

% O vetor das medidas polar tem que ser organizado de O a 360 (significa % colocar de O a 180 e depois de -180 a -10 para compor o vetor)

diagrama_simulado_horizontal_freq3 = [0.167111919585 0.0822385060018319 0.0992680169933147 0.104343022744292 0.0833682488820984 0.0750687589473802 0.158913572752021 0.150422633958147 0.145995640020751 0.189870334377591 0.279157335195873 0.394536597204593 0.428358425855474 0.218132078540056 0.296604305400643 0.592857833843323 0.423237543214253 0.504697456360438 1 0.419891582436411 0.524620241414386 0.676736353177203 0.236683608502671 0.35400471045823 0.503291822900089 0.407733494634069 0.257577319438968 0.142131076169297 0.0790949283066111 0.108683976343115 0.173481782611518 0.159293363886064 0.0747027656666475 0.124515279199915 0.078310708203609 0.0821590571738844 0.167111919585];

%Frequência de 4.8 GHz VERTICAL (phi = 90)

diagrama_simulado_vertical_polar_freq3 = [1 0.762882028774915 0.27349021592792 0.524160793673635 0.825842172950306 0.856078994617005 0.708562914775672 0.509585289881423 0.340757544962226 0.230947562149107 0.177754588720932 0.164326683146227 0.160653361513397 0.132644109183819 0.0864939823622909 0.125949902317659 0.169901206794545 0.150706850122084 0.167111919585 0.167111919585 0.136325264537819 0.0563582890679308 0.0852073048268197 0.106367263283358 0.0950341109892238 0.0788631105214096 0.0938097418772603 0.129816206651181 0.181563959605469 0.26269131425642 0.387920837655909 0.55456440117102 0.715678482269626 0.757118191599884 0.546633125982287 0.290181545057936 1]; diagrama_vertical_polar_freq3 = diagrama_simulado_vertical_polar_freq3.^2;

diagrama_simulado_vertical_freq3 = [0.167111919585 0.136325264537819 0.0563582890679308 0.0852073048268197 0.106367263283358 0.0950341109892238 0.0788631105214096 0.0938097418772603 0.129816206651181 0.181563959605469 0.26269131425642 0.387920837655909 0.55456440117102 0.715678482269626 0.757118191599884 0.546633125982287 0.290181545057936 0.733782006439678 1 0.762882028774915 0.27349021592792 0.524160793673635 0.825842172950306 0.856078994617005 0.708562914775672 0.509585289881423 0.340757544962226 0.230947562149107 0.177754588720932 0.164326683146227 0.160653361513397 0.132644109183819 0.0864939823622909 0.125949902317659 0.169901206794545 0.150706850122084 0.167111919585];

```
%Arquivo com as medidas realizadas
tabmedida = xlsread ('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\caso6\freq 2 85 vertical.xlsx');
%exportando do excel por matlab
tabmedidamanipular = xlsread ('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul_trabalhos\Dissertação\caso6\freq_2_85_vertical.xlsx','B2
:B20');%de 0 a 180
tabmedida manipular = xlsread ('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul_trabalhos\Dissertação\caso6\freq_2_85_vertical.xlsx','B2
1:B38');%de -10 a -180
angi=0;
angf=360;
pa=10;
na=(angf-angi)/pa;
nf=1;
for k = 1: (nf+1)
min=1000;
max = -1000;
j=k;
for i=1:(na+1) %frequência
    medida media(i) = tabmedida(j,2);
    j=j+nf;
    medida media normal(i) = (10^ (medida media(i)/10));
    if medida media(i)<min</pre>
        min=medida media(i);
    end
    if medida media(i)>max
        max=medida media(i);
        maxnorm=medida media normal(i);
    end
end
gmin=min-10;
gmax=max+10;
for i=1:(na+1)
normal(i) = medida media normal(i)/maxnorm;
end
%compondo o vetor normalizado de -180 a 180
normal_ok1 = normal(1:19); %de 0 a 180
normal_ok2 = normal(20:37);%de 190 a 360
normal_ok = [normal_ok2 normal_ok1];
%tentando inverter pra plotar de -180 a 180
medida ok = [tabmedida manipular' tabmedidamanipular']'; %compondo o vetor
de -180 a 180 (aqui ta em dBm, é a potência)
x = angi:(pa):angf;
x1 = 0:(pi/18):2*pi; %variaçao angular em pi
x2 = -180:10:180; %variação de -180 a 180
```

```
%plotando
figure(1)
polar(x1,normal,'r')
hold on,
polar(x1,diagrama_vertical_polar,'b--'),title('Diagrama de Irradiação para
Phi = 90°')
view([90 -90]) %colocando o zero pra cima e não do lado (original do polar)
hold off
figure(2)
plot(x2,normal_ok,'r')
hold on
plot(x2,diagrama_simulado_vertical,'b--'),title('Diagrama de Irradiação
para Phi = 90°')
hold off
end
```

Anexo J

Algoritmo para plotagem da perda de retorno dos *arrays* fabricados

```
o<sup>c</sup>_____
clear all
close all
%colocando as perdas de retorno das antenas com as Medidas feitas no IPQM
freq_inicial = 1*10^9;
freq final = 6*10^9;
f medido = (freq inicial):((freq final-freq inicial)/3201):freq final-
1;%caldulando a variação da frequência medida
f_simulado = (freq_inicial):((freq_final-freq_inicial)/3200):freq_final-
1;%caldulando a variação da frequência simulada
%medida e simulação da primeira antena
s11 1A = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso1\S11-
1A matlab.xlsx', 'E3:E3203');
caso1 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso1\S11-
1A matlab.xlsx', 'K4:K3203');
vswr 1 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso1\S11-
1A matlab.xlsx', 'G3:G3203');
vswr1 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso1\S11-
1A matlab.xlsx', 'M4:M3203');
%medida e simulação da segunda antena
s11 2A = xlsread('C:\Users\vitor
luiz/Desktop/Facul trabalhos/Dissertação/Caso2/S11-2A.xlsx','C3:C3203');
caso2 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul_trabalhos\Dissertação\Caso2\S11-2A.xlsx','L3:L3202');
vswr 2 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso2\S11-2A.xlsx','D3:D3203');
vswr2_simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso2\S11-2A.xlsx','K3:K3202');
%medida e simulação da terceira antena
s11 3A = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso3\S11-3A.xlsx','G2:G3202');
caso3 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso3\S11-3A.xlsx','M2:M3201');
vswr 3 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso3\S11-3A.xlsx','F2:F3202');
vswr3 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso3\S11-3A.xlsx','L2:L3201');
```

```
s11_4A1 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\caso4a\S11-4A1.xlsx','E3:E3203');
caso4 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\caso4a\S11-4A1.xlsx','K3:K3202');
vswr 4 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz/Desktop/Facul trabalhos/Dissertação/Caso4a/S11-4A1.xlsx','C3:C3203');
vswr4 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso4a\S11-4A1.xlsx','J3:J3202');
%medida e simulação da quinta antena
s11 51 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz/Desktop/Facul trabalhos/Dissertação/Caso05/S11-51.xlsx','E3:E3203');
caso5 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso05\S11-51.xlsx','K3:K3202');
vswr 5 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso05\S11-51.xlsx','D3:D3203');
vswr5_simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso05\S11-51.xlsx','J3:J3202');
%medida e simulação da sexta antena
s11 61 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso6\S11-61.xlsx','E3:E3203');
caso6 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso6\S11-61.xlsx','K3:K3202');
vswr 6 = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso6\S11-61.xlsx','D3:D3203');
vswr6 simulado = xlsread('C:\Users\vitor
luiz\Desktop\Facul trabalhos\Dissertação\Caso6\S11-61.xlsx','J3:J3202');
%PLOTANDO AS FIGURAS de PERDA DE RETORNO
figure(1)%plotando a perda retorno da antena 01
plot (f medido,s11 1A,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, casol simulado, 'b-
.', 'LineWidth', 2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11 (dB)'), title ('Perda
de Retorno'),legend('medida','simulado')
figure(2)%plotando a perda retorno da antena 02
plot (f_medido,s11 2A,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, caso2 simulado, 'b-
.', 'LineWidth',2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11(dB)'), title ('Perda
de Retorno'),legend('medida','simulado')
hold off
figure(3)%plotando a perda retorno da antena 03
plot (f medido,s11 3A,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, caso3 simulado, 'b-
.', 'LineWidth',2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11(dB)'), title ('Perda
de Retorno'),legend('medida','simulado')
hold off
figure(4)%plotando a perda retorno da antena 04
plot (f medido,s11 4A1,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, caso4 simulado, 'b-
.', 'LineWidth',2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11(dB)'), title ('Perda
de Retorno'),legend('medida','simulado')
hold off
figure(5)%plotando a perda retorno da antena 05
```

```
plot (f_medido,s11 51,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, caso5 simulado, 'b-
.', 'LineWidth',2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11(dB)'), title ('Perda
de Retorno'),legend('medida','simulado')
hold off
figure(6)%plotando a perda retorno da antena 06
plot (f medido,s11 61,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, caso6 simulado, 'b-
.', 'LineWidth',2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('s11 (dB)'), title ('Perda
de Retorno'),legend('medida','simulado')
hold off
%PLOTANDO AS FIGURAS de VSWR
figure(7)%plotando a perda retorno da antena 01
plot (f_medido,vswr_1,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, vswr1 simulado, 'b-
', 'LineWidth',2), xlabel('frequency(GHz)'), ylabel('VSWR'), title('VSWR'), lege
nd('resultado medido', 'resultado simulado')
hold off
figure(8)%plotando a perda retorno da antena 02
plot (f medido,vswr 2,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, vswr2 simulado, 'b-
', 'LineWidth', 2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('VSWR'), title ('VSWR'), leq
end('resultado medido', 'resultado simulado')
hold off
figure(9)%plotando a perda retorno da antena 03
plot (f medido,vswr 3,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, vswr3 simulado, 'b-
', 'LineWidth',2), xlabel('frequência(GHz)'), ylabel('VSWR'), title('VSWR'), leg
end('resultado medido', 'resultado simulado')
hold off
figure(10)%plotando a perda retorno da antena 04
plot (f medido,vswr 4,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, vswr4 simulado, 'b-
', 'LineWidth',2), xlabel('frequência(GHz)'), ylabel('VSWR'), title('VSWR'), leg
end('resultado medido', 'resultado simulado')
hold off
figure(11)%plotando a perda retorno da antena 05
plot (f medido,vswr 5,'r','LineWidth',2)
hold on
plot (f simulado, vswr5 simulado, 'b-
', 'LineWidth',2), xlabel('frequência(GHz)'), ylabel('VSWR)'), title('VSWR'), le
gend('resultado medido', 'resultado simulado')
hold off
figure(12)%plotando a perda retorno da antena 06
plot (f medido, vswr 6, 'r', 'LineWidth', 2)
hold on
plot (f simulado, vswr6 simulado, 'b-
', 'LineWidth', 2), xlabel ('frequência (GHz)'), ylabel ('VSWR'), title ('VSWR'), leq
end('resultado medido', 'resultado simulado')
hold off
```