



DISSERTAÇÃO

ANTENAS *PATCH* POLARES MULTIBANDA COM FENDAS CATACÁUSTICAS PARA APLICAÇÃO EM COMUNICAÇÕES SEM FIO

Mestrando: Lamarks Tiburtino Campos Cavalcanti

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique da Fonseca Silva

João Pessoa - PB

Outubro de 2020



Lamarks Tiburtino Campos Cavalcanti

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

**ANTENAS *PATCH* POLARES MULTIBANDA COM FENDAS
CATACÁUSTICAS PARA APLICAÇÃO EM COMUNICAÇÕES SEM FIO**

Área de concentração: Eletromagnetismo

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique da Fonseca Silva

João Pessoa - PB, Outubro de 2020

Lamarks Tiburtino Campos Cavalcanti - lamarks.cavalcanti@gmail.com

Lamarks Tiburtino Campos Cavalcanti

**ANTENAS *PATCH* POLARES MULTIBANDA COM FENDAS
CATACÁUSTICAS PARA APLICAÇÃO EM COMUNICAÇÕES SEM FIO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 2 de Outubro de 2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr. - IFPB
Orientador



Prof. Alfrêdo Gomes Neto, Dr. - IFPB
Examinador Interno



Prof. José Patrocínio da Silva, Dr. - UFRN
Examinador Externo



Prof. Alexandre Jean René Serres, Dr. - UFCG
Examinador Externo

João Pessoa - PB

Outubro de 2020

Aos meus pais Pedro e Ana, que acreditaram em mim e fizeram grandes sacrifícios, DEDICO.

Agradecimentos

Agradeço ao Instituto Federal da Paraíba pela oportunidade de aproveitar um ambiente criativo e amigável que me levou ao êxito de concluir mais uma etapa na minha vida.

Aos meus pais, Pedro e Ana, que nunca mediram esforços para me ensinar o caminho do bem, e sempre me apoiaram em todas as etapas da minha vida. Sem vocês, eu não chegaria até aqui.

Assim como à minha família, sinônimo de amor e união. Obrigada por acreditar no meu sonho e sempre me motivar a seguir em frente. É muito bom saber que posso contar com vocês em todos os momentos.

Além do corpo docente e da banca examinadora que pelo incentivo e conhecimento passado, os quais foram de suma importância para a elaboração desta dissertação.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, por todos os ensinamentos compartilhados de forma admirável, pela convivência agradável no dia-a-dia e por me guiar nos primeiros passos da pós-graduação. Suas contribuições foram importantes para a concretização de todas as pesquisas desenvolvidas nesta dissertação.

Agradeço aos amigos que fiz durante a pós-graduação e embarcaram comigo no sonho da conclusão do Mestrado. Dividimos o tempo, os sonhos e as dificuldades juntos. Ter vocês por perto foi essencial para que eu conseguisse seguir em frente.

Ao amigo Tales Augusto e Rômulo Rodrigues, companheiros das longas discussões de projetos e análises na Sala do Mestrado, pelo companheirismo no laboratório e na vida. Vocês tornaram os dias de trabalho muito mais leves e divertidos.

Ao Prof. Haeckel, o principal motivo de ter iniciado a pós-graduação. Pessoa admirável e um grande exemplo de dedicação. Realiza seu trabalho de forma brilhante, e ainda ajuda todos à sua volta. Agradeço do fundo do coração por todo tempo destinado a me ajudar, sempre com calma e atenção.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

Resumo

Nesta dissertação, descreve-se o desenvolvimento de antenas *patch* com fendas catacáusticas, os quais apresentam respostas multibanda para aplicação em comunicações sem fio: telefonia celular, Wi-Fi e WiMAX. Inspiradas no princípio óptico de curvas cáusticas geradas por reflexão na circunferência e cardioide, as fendas catacáusticas foram introduzidas em antenas *patch* para sintonizar as frequências ressonantes. As antenas *patch* propostas são alimentadas por linhas em microfitas com transformadores de quarto de onda para o casamento de impedâncias. As fendas catacáusticas tiveram seus tamanhos alterados com o objetivo de fazer a sintonia de frequências. As antenas foram projetadas com MATLAB[®] e suas propriedades de irradiação e ressonantes analisadas com o uso do *software* comercial ANSYS Designer[®]. As caracterizações experimentais dos protótipos fabricados das antenas *patch* foram realizadas com o uso de um analisador de redes vetorial (Agilent Technologies, modelo N5230A). A concordância obtida entre os resultados simulados e medidos validou a metodologia adotada e comprovou a propriedade de sintonização de frequências para as antenas *patch* multibanda abordadas.

Palavras-chaves: Antenas *Patch* Multibanda. Elementos Polares. Fendas Catacáusticas. Comunicações Sem Fio.

Abstract

In this dissertation, it is describe the development of patch antennas with catacaustic slots, which present multiband responses for wireless communications applications: cell phone communication, Wi-Fi and WiMAX. Inspired by the optical of caustic curves generated by reflection in the circumference and cardioid, catacaustic slots were introduced in patch antennas to tune the resonant frequencies. The proposed patch antennas are fed by microstrip lines with quarter-wave transformers for matching impedances. The catacaustic slots had their sizes changed in order to tune frequencies. The antennas were designed using MATLAB[®] and their irradiation and resonant properties were analyzed using the commercial software ANSYS Designer[®]. The experimental characterization of prototypes manufactured from patch antennas was performed using a vector network analyzer (Agilent Technologies, model N5230A). The agreement obtained between the simulated and measured results validated the adopted methodology and verified the property of frequency tuning for the multiband patch antennas studied.

Keywords: Multiband Patch Antennas. Polar Elements. Catacaustic Slots. Wireless Communications.

Lista de Figuras

Figura	3.1:	Geração de curva cardioide como uma epicloide.	10
Figura	3.2:	Geração de curva catacáustica (cardioide) de uma circunferência por reflexão da luz em superfície metálica.	11
Figura	3.3:	Geração da curva catacáustica (cardioide) de uma circunferência por: (a) simulação simplificada em MATLAB®; (b) simulação em MATLAB® com presença das retas tangentes.	11
Figura	3.4:	Geração de curva nefroide como uma epicloide.	12
Figura	3.5:	Geração da curva catacáustica (nefroide) de um cardioide por: (a) simulação simplificada em MATLAB®; (b) simulação em MATLAB® com presença das retas tangentes.	13
Figura	3.6:	Geração de curva catacáustica da circunferência (nefroide) com o foco no infinito.	14
Figura	3.7:	Curvas nefroides geradas internamente em nefroides.	14
Figura	3.8:	Exemplo de <i>patch</i> cardioide desenhado em MATLAB®.	15
Figura	3.9:	Exemplo de fenda catacáustica de cardioide (nefroide) completa desenhada em MATLAB®.	16
Figura	3.10:	Exemplo de leiaute da antena <i>patch</i> cardioide com fenda catacáustica (nefroide) completa desenhada em MATLAB®.	17
Figura	3.11:	Exemplo de <i>patch</i> nefroide desenhado em MATLAB®.	19
Figura	3.12:	Exemplo de fenda catacáustica completa da nefroide (nefroide) desenhada em MATLAB®.	19
Figura	3.13:	Exemplo de leiaute de antena <i>patch</i> nefroide com fenda catacáustica (nefroide) completa desenhada em MATLAB®.	20
Figura	3.14:	Exemplo de <i>patch</i> circular desenhado em MATLAB®.	22
Figura	3.15:	Exemplo de fenda catacáustica de circunferência (cardioide) completa desenhada em MATLAB®.	23
Figura	3.16:	Exemplo de leiaute de antena <i>patch</i> circular com fenda catacáustica (cardioide) completa desenhada em MATLAB®.	23
Figura	4.1:	Diagrama em blocos da metodologia adotada.	25
Figura	4.2:	Exemplo de leiaute da antena <i>patch</i> cardioide com fenda desenhada em MATLAB®.	26
Figura	5.1:	Antena <i>patch</i> cardioide sem fenda projetada para 3,5 GHz e 5 GHz do Projeto 1: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.	28
Figura	5.2:	Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 GHz e 5 GHz do Projeto 1.	29

Figura	5.3:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz do Projeto 1.	30
Figura	5.4:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz do Projeto 1.	30
Figura	5.5:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz do Projeto 1.	31
Figura	5.6:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 1 simulado para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda, cuja a frequência de 3,468 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8126 - j0,0531$	31
Figura	5.7:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 5,411 GHz do Projeto 1.	32
Figura	5.8:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda para a banda de WLAN 5 GHz do Projeto 1.	32
Figura	5.9:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 5,411 GHz do Projeto 1.	33
Figura	5.10:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 1 simulado para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda, cuja a frequência de 5,411 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8750 - j0,1608$	33
Figura	5.11:	Antena <i>patch</i> cardioide com fenda projetada para as bandas de 2,4 GHz e 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.	34
Figura	5.12:	Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda projetada para as bandas de frequências de 2,4 GHz e 5 GHz.	35
Figura	5.13:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz do Projeto 2.	35
Figura	5.14:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz do Projeto 2.	36
Figura	5.15:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz do Projeto 2.	36
Figura	5.16:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 2 simulado para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda cuja a frequência de 2,444 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0103 - j0,2832$	37

Figura 5.17:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz do Projeto 2.	37
Figura 5.18:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz do Projeto 2.	38
Figura 5.19:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz do Projeto 2.	38
Figura 5.20:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 2 simulado para a antena <i>patch</i> cardioide com fenda, cuja a frequência de 5,402 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8775 - j0,0849$	39
Figura 5.21:	Antena <i>patch</i> cardioide sem fenda projetada para 3,5 GHz: (a) Layout desenhado; (b) imagem da antena fabricada.	39
Figura 5.22:	Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda projetada para as banda de frequência de 3,5 GHz.	40
Figura 5.23:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz do Projeto 3.	41
Figura 5.24:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz do Projeto 3.	41
Figura 5.25:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz do Projeto 3.	42
Figura 5.26:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 3 simulado para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda, cuja a frequência de 2,185 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8921 - j0,1647$	42
Figura 5.27:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz do Projeto 3.	43
Figura 5.28:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz do Projeto 3.	43
Figura 5.29:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz do Projeto 3.	44
Figura 5.30:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 3 simulado para a antena <i>patch</i> cardioide sem fenda, cuja a frequência de 3,461 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0263 - j0,0461$	44

Figura 5.31:	Antena <i>patch</i> cardioide com fenda projetada para 1800 MHz e 3,5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antenna fabricada.	45
Figura 5.32:	Comparação entre os resultados simulado e medido para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda projetada para as bandas de frequências de 1800 MHz e 3,5 GHz.	46
Figura 5.33:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz do Projeto 4.	46
Figura 5.34:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2 para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz do Projeto 4.	47
Figura 5.35:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D do Projeto 4 para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz.	47
Figura 5.36:	Presenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 4 simulado para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda, cuja a frequência de 1,822 GHz apresenta impedância normalizada, $Z = 1,0628 - j0,2331$, para 50Ω	48
Figura 5.37:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz do Projeto 4.	48
Figura 5.38:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz do Projeto 4.	49
Figura 5.39:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz do Projeto 4.	49
Figura 5.40:	Carta de Smith do Projeto 4 simulada pelo ANSYS Designer® para a antenna <i>patch</i> cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz e impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9887 - j0,0088$	50
Figura 5.41:	Comparação dos tamanhos das fendas para as antenas <i>patch</i> cardioide desenhadas com auxílio do MATLAB® para $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,86$ mm, $L_{qwt} = 9,8$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para $2\pi/\theta_f$ igual a: (a) 0,000 rad; (b) 0,785 rad; (c) 0,986 rad; (d) 1,323 rad; (e) 2,011 rad; (f) 4,189 rad.	51
Figura 5.42:	Análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas <i>patch</i> cardioide simuladas pelo ANSYS Designer® em função dos comprimentos das fendas catacústicas (nefroide).	53
Figura 5.43:	Antena <i>patch</i> nefroide sem fenda projetada para as bandas de WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antenna fabricada.	55

Figura 5.44:	Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda projetada para as bandas de frequências de WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz.	55
Figura 5.45:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem na frequência de 2,698 GHz do Projeto 5.	56
Figura 5.46:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 2,698 GHz do Projeto 5.	57
Figura 5.47:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 2,698 GHz do Projeto 5.	57
Figura 5.48:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 5 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,698 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9174 - j0,0248$	58
Figura 5.49:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz do Projeto 5.	58
Figura 5.50:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz do Projeto 5.	59
Figura 5.51:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz do Projeto 5.	59
Figura 5.52:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3 GHz do Projeto 5 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,767 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0573 - j0,2085$	60
Figura 5.53:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz do Projeto 5.	60
Figura 5.54:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz do Projeto 5.	61
Figura 5.55:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz do Projeto 5.	61
Figura 5.56:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 5 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,454 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8285 - j0,0282$	62
Figura 5.57:	Antena <i>patch</i> nefroide com fenda projetada para as bandas de 3,5 GHz e 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.	62

Figura 5.58:	Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 e 5 GHz.	63
Figura 5.59:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz do Projeto 6.	64
Figura 5.60:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz do Projeto 6.	64
Figura 5.61:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz do Projeto 6.	65
Figura 5.62:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 6 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda, cuja a frequência de 2,687 GHz apresenta impedância normalizada, $Z = 1,1818 - j0,0673$, para 50Ω	65
Figura 5.63:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz do Projeto 6.	66
Figura 5.64:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz do Projeto 6.	66
Figura 5.65:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz do Projeto 6.	67
Figura 5.66:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 6 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda, cuja a frequência de 3,506 GHz apresenta impedância normalizada, $Z = 1,0875 - j0,1236$, para 50Ω	67
Figura 5.67:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz do Projeto 6.	68
Figura 5.68:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz do Projeto 6.	68
Figura 5.69:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz do Projeto 6.	69
Figura 5.70:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 6 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide com fenda, cuja a frequência de 5,411 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8238 + j0,0528$	69
Figura 5.71:	Antena <i>patch</i> nefroide sem fenda projetada para as bandas de WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.	70

Figura 5.72:	Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda projetada para as bandas de WLAN 2,4 GHz e WLAN 5 GHz.	71
Figura 5.73:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz do Projeto 7.	72
Figura 5.74:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz do Projeto 7.	72
Figura 5.75:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz do Projeto 7.	73
Figura 5.76:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 7 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,732 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8787 + j0,1183$	73
Figura 5.77:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz do Projeto 7.	74
Figura 5.78:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz do Projeto 7.	74
Figura 5.79:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz do Projeto 7.	75
Figura 5.80:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 7 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,540 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0006 - j0,3382$	75
Figura 5.81:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz do Projeto 7.	76
Figura 5.82:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz do Projeto 7.	76
Figura 5.83:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz do Projeto 7.	77
Figura 5.84:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 7 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,623 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,1461 + j0,2100$	77
Figura 5.85:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz do Projeto 7.	78

Figura	5.86: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz do Projeto 7.	78
Figura	5.87: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz do Projeto 7.	79
Figura	5.88: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 7 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 6,604 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,7289 - j0,0293$	79
Figura	5.89: Antena <i>patch</i> nefroide sem fenda projetada para as bandas de 1800 MHz, 2,4 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.	80
Figura	5.90: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda projetada para as bandas de frequências de 1800 MHz, 2,4 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz.	81
Figura	5.91: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz do Projeto 8.	81
Figura	5.92: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz do Projeto 8.	82
Figura	5.93: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz do Projeto 8.	82
Figura	5.94: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 8 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 1,748 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0263 - j0,1065$	83
Figura	5.95: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 2,432 GHz do Projeto 8.	83
Figura	5.96: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 2,432 GHz do Projeto 8.	84
Figura	5.97: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 2,432 GHz do Projeto 8.	84
Figura	5.98: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 8 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,432 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0491 + j0,0688$	85
Figura	5.99: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,490 GHz do Projeto 8.	85

Figura 5.100:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,490 GHz do Projeto 8.	86
Figura 5.101:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 3,490 GHz do Projeto 8.	86
Figura 5.102:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 8 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,490 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,7737 - j0,4143$	87
Figura 5.103:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz do Projeto 8.	87
Figura 5.104:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz do Projeto 8.	88
Figura 5.105:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz do Projeto 8.	88
Figura 5.106:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 4 GHz do Projeto 8 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 4,434 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8020 + j0,2692$	89
Figura 5.107:	Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz do Projeto 8.	89
Figura 5.108:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz do Projeto 8.	90
Figura 5.109:	Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz do Projeto 8.	90
Figura 5.110:	Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 8 simulado para a antena <i>patch</i> nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,548 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0378 - j0,0905$	91
Figura 5.111:	Comparação dos tamanhos das fendas para as antenas <i>patch</i> nefroide desenhadas com auxílio do MATLAB [®] para $A = 5$ mm, $W_{qwt} = 1,2$ mm, $L_{qwt} = 12$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para $2\pi/\theta_f$ igual a: (a) 0,000 rad; (b) 2,043 rad; (c) 2,856 rad.	91
Figura 5.112:	Análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas <i>patch</i> nefroide em função dos comprimentos das fendas catacáusticas da circunferência interna gerada pelas cúspides (nefroide).	93
Figura 5.113:	Antena <i>patch</i> circular sem fenda projetada para a banda de WLAN 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.	95

Figura 5.114: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular sem fenda projetada para as bandas de frequências de WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz. 95

Figura 5.115: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz do Projeto 9. 96

Figura 5.116: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz do Projeto 9. . . 96

Figura 5.117: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz do Projeto 9. . . 97

Figura 5.118: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3 GHz do Projeto 9 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 3,309 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω , $Z = 0,8474 - j0,1970$ 97

Figura 5.119: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz do Projeto 9. 98

Figura 5.120: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz do Projeto 9. . . 98

Figura 5.121: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz do Projeto 9. . . 99

Figura 5.122: Carta de Smith do Projeto 9 simulada pelo ANSYS Designer® para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz e impedância normalizada para 50 Ω , $Z = 0,9731 - j0,0678$ 99

Figura 5.123: Antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de 3,5 GHz e 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada. 100

Figura 5.124: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 GHz e 5 GHz. 100

Figura 5.125: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz do Projeto 10. 101

Figura 5.126: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz do Projeto 10. . . 101

Figura 5.127: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz do Projeto 10. . . 102

Figura 5.128: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 3,432 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,8260 - j0,1259$ 102

Figura 5.129: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz do Projeto 10. 103

Figura 5.130: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz do Projeto 10. 103

Figura 5.131: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz do Projeto 10. 104

Figura 5.132: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 5,680 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 1,0147 - j0,0739$ 104

Figura 5.133: Antena *patch* circular sem fenda projetada para a banda de WMAN 3,5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada. 105

Figura 5.134: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular sem fenda projetada para as bandas de frequências de 2 GHz e WMAN 3,5 GHz. 105

Figura 5.135: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz do Projeto 11. 106

Figura 5.136: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz do Projeto 11. 107

Figura 5.137: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz do Projeto 11. 107

Figura 5.138: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 2,116 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,9469 - j0,1888$ 108

Figura 5.139: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz do Projeto 11. 108

Figura 5.140: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz do Projeto 11. 109

Figura 5.141: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz do Projeto 11. 109

Figura 5.142: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 3,502 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9235 - j0,0616$ 110

Figura 5.143: Antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de 1800 MHz e 3,5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada. 110

Figura 5.144: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de frequências de 1800 MHz e 3,5 GHz do Projeto 12. 111

Figura 5.145: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz do Projeto 12. 112

Figura 5.146: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz do Projeto 12. . 112

Figura 5.147: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz do Projeto 12. . 113

Figura 5.148: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 12 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 1,790 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0887 - j0,1518$ 113

Figura 5.149: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz do Projeto 12. 114

Figura 5.150: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz do Projeto 12. . 114

Figura 5.151: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz do Projeto 12. . 115

Figura 5.152: Carta de Smith do Projeto 12 simulada pelo ANSYS Designer® para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz e impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9086 - j0,0498$ 115

Figura 5.153: Comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* circular desenhadas com auxílio do MATLAB® para $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,67$ mm, $L_{qwt} = 7$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para $2\pi/\theta_f$ igual a: (a) 0,000 rad; (b) 1,257 rad; (c) 1,551 rad; (d) 2,027 rad; (e) 2,922 rad; (f) 5,236 rad. 116

Figura 5.154: Análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* circular de dimensões menores em função dos comprimentos das fendas catacústicas (cardioide). 117

Figura 5.155: Comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* circular desenhadas com auxílio do MATLAB[®] para $A = 15,5$ mm, $W_{qwt} = 0,625$ mm, $L_{qwt} = 12,25$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para $2\pi/\theta_f$ igual a: (a) 0,000 rad; (b) 1,257 rad; (c) 1,551 rad; (d) 2,027 rad; (e) 2,922 rad; (f) 5,236 rad. 118

Figura 5.156: Análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* circular de dimensões maiores em função dos comprimentos das fendas catacústicas (cardioide). 119

Lista de Tabelas

Tabela 2.1:	Subfaixas de frequências para SMP.	4
Tabela 2.2:	Subfaixas de extensões de frequências para SMP.	5
Tabela 2.3:	Plano de canais e frequências para DSSS PHY.	6
Tabela 5.1:	Parâmetros geométricos para projetos de antenas <i>patch</i> cardioide. . .	28
Tabela 5.2:	Relações das frequências em porcentagem para antenas <i>patch</i> cardioide simuladas em ANSYS Designer®.	52
Tabela 5.3:	Parâmetros geométricos para projetos de antenas <i>patch</i> nefroide. . . .	54
Tabela 5.4:	Relações das frequências em porcentagem para antenas <i>patch</i> nefroide. . .	92
Tabela 5.5:	Parâmetros geométricos para projetos de antenas <i>patch</i> circular. . . .	94
Tabela 5.6:	Relações das frequências em porcentagem para antenas <i>patch</i> circular para $A = 10$ mm e para $A = 15,5$ mm.	120

Lista de Siglas e Abreviaturas

2G	Segunda Geração de Padrões e Tecnologias da Telefonia Móvel
3G	Terceira Geração de Padrões e Tecnologias da Telefonia Móvel
4G	Quarta Geração de Padrões e Tecnologias da Telefonia Móvel
5G	Quinta Geração de Padrões e Tecnologias da Telefonia Móvel
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
AP	Ponto de Acesso, do inglês <i>Access Point</i>
BWA	Acesso Sem Fio Banda Larga, do inglês <i>Broadband Wireless Access</i>
CPW	Guia de Onda Coplanar, do inglês <i>Coplanar Waveguide</i>
DSSS	Sequência Direta de Espalhamento do Espectro, do inglês <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
DXF	Formato de Intercâmbio de Desenho, do inglês <i>Drawing Exchange Format</i>
ERB	Estação Rádio Base
FBWA	Acesso Sem Fio Banda Larga Fixo, do inglês <i>Fixed Broadband Wireless Access</i>
FM	Modulação de Frequência, do inglês <i>Frequency Modulation</i>
GPS	Sistema de Posicionamento Global, do inglês <i>Global Positioning System</i>
GSM	Sistema Global para Comunicação Móvel, do inglês <i>Global System for Mobile Communications</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos, do inglês <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISM	Industrial, Científico e Médico, do inglês <i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LTE	Evolução de Longo Prazo, do inglês <i>Long Term Evolution</i>
MAC	Controle de Acesso Médio, do inglês <i>Medium Access Control</i>

MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas, do inglês <i>Multiple Input Multiple Output</i>
NFC	Comunicação por Campo Próximo, do inglês <i>Near Field Communication</i>
OFDM	Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal, do inglês <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	Interconexões de Sistemas Abertos, do inglês <i>Open Systems Interconnection</i>
PHY	Camada Física, do inglês <i>Physical Layer</i>
SMP	Serviço Móvel Pessoal
TM	Transversal Magnético
UWB	Banda Ultralarga, do inglês <i>Ultra Wideband</i>
Wi-Fi	Fidelidade Sem Fio, do inglês <i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	Interoperabilidade Mundial para Acesso por Microondas, do inglês <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	Rede Local Sem Fio, do inglês <i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	Rede Metropolitana Sem Fio, do inglês <i>Wireless Metropolitan Area Network</i>

Lista de Símbolos e Variáveis

ϵ_r	Constante dielétrica relativa
ι	Posição do foco luminoso
θ_f	Fator de divisão para cálculo das fendas
$ S_{11} $	Módulo do coeficiente de reflexão
a	Variável auxiliar
A	Raio de circunferência base para funções polares
$H_{ele.irr}$	Altura do elemento irradiante
$L_{fenda.car}$	Comprimento de fenda catacústica cardioide
$L_{fenda.nef}$	Comprimento de fenda catacústica nefroide
$L_{fen.mai}$	Comprimento de fenda maior catacústica cardioide para análises paramétricas da antenas <i>patch</i> circular
$L_{fen.men}$	Comprimento de fenda menor catacústica cardioide para análises paramétricas da antenas <i>patch</i> circular
L_{qwt}	Comprimento do transformador de quarto de onda
r	Raio de curvas polares
S_{11}	Coeficiente de reflexão
$\vec{s}(t)$	Comprimento de curva parametrizada
t	Coordenada polar (ângulo polar ou azimute)
W_{qwt}	Largura do transformador de quarto de onda
$W_{ele.irr}$	Largura do elemento irradiante
w_f	Espessura de fenda catacústica
$x_{1.fenda.car}$	Abcissa na primeira curva da componente da fenda circular
$x_{1.fenda.nef}$	Abcissa na primeira curva da componente da fenda nefroide
$x_{2.fenda.car}$	Abcissa na segunda curva da componente da fenda circular

$x_{2.fenda.nef}$	Abcissa na segunda curva da componente da fenda nefroide
x_{car}	Abcissa na curva cardioide
x_{cir}	Abcissa na curva circular
x_{nef}	Abcissa na curva nefroide
$x_{med.fen.car}$	Abcissa na curva da fenda circular
$x_{med.fen.nef}$	Abcissa na curva da fenda nefroide
$y_{1.fenda.car}$	Ordenada na primeira curva da componente da fenda circular
$y_{1.fenda.nef}$	Ordenada na primeira curva da componente da fenda nefroide
$y_{2.fenda.car}$	Ordenada na segunda curva da componente da fenda circular
$y_{2.fenda.nef}$	Ordenada na segunda curva da componente da fenda nefroide
y_{car}	Ordenada na curva cardioide
y_{cir}	Ordenada na curva circular
y_{nef}	Ordenada na curva nefroide
$y_{med.fen.car}$	Ordenada na curva da fenda circular
$y_{med.fen.nef}$	Ordenada na curva da fenda nefroide
Z	Impedância normalizada

Sumário

1	Introdução	1
2	Estado da Arte	3
2.1	Antenas <i>Patch</i> Multibanda com Fendas	3
2.2	Bandas de Frequências para Telefonia Móvel	3
2.3	Bandas de Frequências para Redes Locais sem Fio	5
2.3.1	Banda de Frequências em 2,4 GHz	6
2.3.2	Banda de Frequências em 5 GHz	6
2.4	Bandas de Frequências para WMAN em 3,5 GHz	7
3	Fundamentação Teórica	9
3.1	Curvas Cáusticas e Polares	9
3.1.1	Curvas Cáusticas	9
3.1.2	Curvas Cardioides	9
3.1.3	Curvas Nefroides	12
3.1.4	Nefroide como Curva Catacáustica do Cardioide e da Circunferência	13
3.2	Equações das Antenas <i>Patch</i> Cardioide com Fendas Catacáusticas	15
3.2.1	Equações do <i>Patch</i> para Elemento Irradiante Cardioide	15
3.2.2	Equações da Fenda para Elemento Irradiante Cardioide	16
3.2.3	Cálculo do Comprimento da Curva da Fenda do Cardioide	17
3.3	Equações das Antenas <i>Patch</i> Nefroide com Fendas Catacáusticas	18
3.3.1	Equações do <i>Patch</i> para Elemento Irradiante Nefroide	18
3.3.2	Equações da Fenda para Elemento Irradiante Nefroide	19
3.3.3	Cálculo do Comprimento da Curva da Fenda da Nefroide	20
3.4	Equações das Antenas <i>Patch</i> Circular com Fendas Catacáusticas	21
3.4.1	Equações do <i>Patch</i> para Elemento Irradiante Circular	21
3.4.2	Equações da Fenda para Elemento Irradiante Circular	22
3.4.3	Cálculo do Comprimento da Curva da Fenda para Circular	24
4	Metodologia	25
5	Resultados	27
5.1	Antenas <i>Patch</i> Cardioide com Fendas Catacáusticas	27
5.1.1	Parâmetros de Projetos para Antenas <i>Patch</i> Cardioide	27
5.1.2	Projeto 1: Antena <i>Patch</i> Cardioide sem Fenda para 3,468 GHz e 5,411 GHz	28

5.1.3	Projeto 2: Antena <i>Patch</i> Cardioide com Fenda para 2,444 GHz e 5,402 GHz	34
5.1.4	Projeto 3: Antena <i>Patch</i> Cardioide sem Fenda para 2,185 GHz e 3,461 GHz	39
5.1.5	Projeto 4: Antena <i>Patch</i> Cardioide com Fenda para 1,822 GHz e 3,493 GHz	45
5.1.6	Análise Paramétrica de Antenas <i>Patch</i> Cardioide com Fendas Catacáusticas	50
5.2	Antenas <i>Patch</i> Nefroide com Fendas Catacáusticas	53
5.2.1	Parâmetros de Projetos para Antenas <i>Patch</i> Nefroide	54
5.2.2	Projeto 5: Antena <i>Patch</i> Nefroide sem Fenda para 2,698 GHz, 3,767 GHz e 5,454 GHz	54
5.2.3	Projeto 6: Antena <i>Patch</i> Nefroide com Fenda para 2,687 GHz, 3,506 GHz e 5,411 GHz	62
5.2.4	Projeto 7: Antena <i>Patch</i> Nefroide sem Fenda para 2,732 GHz, 3,540 GHz, 5,623 GHz e 6,604 GHz	70
5.2.5	Projeto 8: Antena <i>Patch</i> Nefroide sem Fenda para 1,748 GHz, 2,432 GHz, 3,490 GHz e 5,548 GHz	79
5.2.6	Análise Paramétrica de Antenas <i>Patch</i> Nefroide com Fendas Catacáusticas	91
5.3	Antenas <i>Patch</i> Circular com Fendas Catacáusticas	93
5.3.1	Parâmetros de Projetos para Antenas <i>Patch</i> Circular	94
5.3.2	Projeto 9: Antena <i>Patch</i> Circular sem Fenda para 3,309 GHz e 5,459 GHz	94
5.3.3	Projeto 10: Antena <i>Patch</i> Circular com Fenda para 3,432 GHz e 5,680 GHz	99
5.3.4	Projeto 11: Antena <i>Patch</i> Circular sem Fenda para 2,116 GHz e 3,502 GHz	104
5.3.5	Projeto 12: Antena <i>Patch</i> Circular com Fenda para 1,790 GHz e 3,590 GHz	110
5.3.6	Análise Paramétrica da Antenas <i>Patch</i> Circular com Fendas Catacáusticas	115
5.3.6.1	Análise Paramétrica de Antenas <i>Patch</i> Circular para $A = 10$ mm	116
5.3.6.2	Análise Paramétrica de Antenas <i>Patch</i> Circular para $A = 15,5$ mm	117
5.3.6.3	Comparação entre Antenas <i>patch</i> Circular para $A = 10$ mm e para $A = 15,5$ mm	119
6	Conclusão	121

Referências 123

Capítulo 1

Introdução

As fendas em estruturas irradiantes permitem uma maior versatilidade nos projetos de antenas. Desse modo, as aplicações em operações de comunicações sem fio em banda larga, multibanda, [1]. As fendas mais comuns em antenas *patch* são as de formatos da letra U e suas variações, [2]. Além de que é possível sintonizar as frequências de ressonância alterando os tamanhos das fendas. Assim, é possível fabricar antenas para aplicações em WLAN, WMAN e promovendo o desenvolvimento da área de comunicações sem fio, [3]-[5].

Devido ao rápido crescimento das comunicações móveis e taxas de transmissão, foi necessário criar novas tecnologias de comunicações sem fio aliadas aos novos modelos de antenas. As tecnologias passaram de analógicas para digitais com o surgimento dos sistemas GSM, 2G, 3G, 4G/LTE e atualmente, 5G. Desse modo, foi necessário fazer adaptações no espectro de frequências para alocação de novos serviços. A instituição responsável para definir as regras e normas de operações por meio de resoluções foi a Anatel. Uma das principais é a Resolução nº 454, de 11 de Dezembro de 2006, em que foi aprovada a regulamentação sobre as condições de uso de radiofrequências nas faixas de 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz e 2100 MHz, [6].

Assim como as normas de telefonia móvel, também foram desenvolvidas normas para redes locais sem fio. As normas de funcionamento das redes locais sem fio foram desenvolvidas na década de 1980 para as bandas ISM (do inglês *Industrial, Scientific and Medical*) nas faixas de 900 MHz, 2,4 GHz e 5 GHz. Mas sua utilização tem aumentado a partir da década de 2000 para uso cotidiano, devido às melhorias de infraestruturas da Internet e ao avanço das telecomunicações aliadas com a diminuição dos custos de implantação. Desse modo, aumentando a conectividade e a mobilidade dos seus usuários.

O WLAN é usado e continua sendo amplamente estudado, gerando novas aplicações, melhorias nas comunicações e no desenvolvimento de novos produtos. Além de existirem pesquisas que focam na economia de energia, assim permitindo maior autonomia dos equipamentos portáteis móveis, [7], [8].

Do mesmo modo das redes locais, as redes metropolitanas sem fio pretendem disponibilizar acessos sem fio à rede mundial de computadores, mas para áreas amplas. O WiMAX foi desenvolvido por um grupo de empresas, cujo objetivo foi promover interoperabilidade e compatibilidade entre os equipamentos que usam o WMAN.

No entanto, a segurança digital das redes locais e redes metropolitanas sem fio ainda tem que ser estudada e melhorada. Partindo do princípio que o sinal propaga-se pelo ar em todas as direções quando não se tem elementos bloqueadores ou direcionadores, as

redes sem fio estão vulneráveis a qualquer acesso, seja em aplicações *indoor* ou *outdoor*. Por esse motivo, os padrões de comunicações evoluem de acordo com a necessidade ou, simplesmente, são alterados por emendas para atender alguma falta.

E ao mesmo tempo que as tecnologias de comunicações sem fio são aperfeiçoadas, os aparelhos portáteis sem fio se tornam menores e conseguem operar com mais bandas de frequências para múltiplas funções. Os dispositivos usados em telefonia móvel reduziram o tamanho e podem ter acessos Wi-Fi, 3G, 4G, 5G, *Bluetooth*, GPS, NFC, entre outros serviços. Desse modo, tem-se a necessidade de que as antenas operem em multibanda, com o objetivo de economizar espaço interno nos aparelhos portáteis de comunicações.

Além de aparelhos pequenos, estruturas grandes, como ERBs, podem também usar recursos de antenas multibanda de frequências em operações de comunicações. Isso gera economia de espaço na estrutura de suporte e menor custo. Além de poder permitir melhores serviços, pois outras bandas de frequências podem ser utilizadas como comparativo de qualidade de serviço ou como redundância em caso de falhas.

Com a contribuição da óptica geométrica, foi praticável a sintonia de frequências de ressonância a partir de fendas calculadas matematicamente com o objetivo de promover melhores sintonias de frequências em comunicações sem fio. As fendas baseadas em curvas catacústicas apresentam efeitos expressivos no controle das frequências de ressonância das antenas *patch*.

Esta dissertação descreve o desenvolvimento de antenas *patch* em microfita com elementos irradiantes definidos em coordenadas polares e fendas catacústicas, que apresentam respostas multibanda para aplicações em comunicações sem fio: Wi-Fi e WiMAX. Inspiradas no princípio óptico de curvas cáusticas geradas por reflexão em curvas polares, as fendas catacústicas foram introduzidas em antenas *patch*.

As antenas *patch* propostas foram alimentadas por linhas de microfita com transformador de quarto de onda para os casamentos de impedâncias. As antenas foram projetadas e suas propriedades de irradiação e de ressonância foram analisadas com o uso do *software* comercial ANSYS Designer[®]. As caracterizações experimentais dos protótipos fabricados de antenas *patch* foram realizadas com o uso de um analisador de redes vetorial.

Este trabalho está distribuído em 6 capítulos, buscando evidenciar o referencial teórico e bibliográfico para o estudo de antenas *patch* polares multibanda. O Capítulo 2 apresenta o estado da arte do trabalho. O Capítulo 3 expõe a fundamentação teórica da teoria de antenas multibanda, telefonia celular, WLAN, WMAN e curvas polares. O Capítulo 4 apresenta a metodologia adotada em um diagrama em blocos. Enquanto que o Capítulo 5 apresenta os resultados e caracterizações das antenas *patch* cardioide, nefroide e circular. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões sobre os resultados obtidos.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Antenas *Patch* Multibanda com Fendas

A inclusão de fendas permite versatilidade nos projetos de antenas *patch*. Assim, pode-se apresentar aplicações em operações de comunicações sem fio em banda larga, multibanda. As mais comuns são as fendas retangulares, circulares, poligonais, com formatos da letra U e suas variações (metade de U, duplo, triplo, invertido, entre outras). No entanto, além das fendas em U, também é possível apresentar fendas no formato da letra V, assim como, antenas *patch* com duas fendas paralelas que apresentam características semelhantes as antenas com fendas em U, [2].

É possível controlar as frequências de ressonância alterando os tamanhos das fendas, quando fendas no formato da letra U são aplicadas em antenas *patch* retangular alimentadas por linhas de microfita. Assim é possível realizar a sintonia de uma antena para frequências de ressonâncias em 7,7 GHz até 8,5 GHz para aplicações em comunicações por satélite. Ademais, possibilitar a fabricação de antenas para aplicações em WLAN, WMAN e telefonia celular, [3]-[5].

O aumento da largura de banda é possível a partir da redução dos modos transversais magnéticos, TM, da antena *patch* quando as fendas são aplicadas. Como consequência têm-se mudanças nas distribuições de densidades de correntes das antenas, [9]. Além de ser possível obter antenas com larguras de banda acima de 0,6 GHz e com ganhos superiores a 5 dBi para WLAN 5 GHz a partir das fendas em U como exemplo das aplicações das fendas, [10].

Além de poder obter maior largura de banda, pode-se ter operações em frequências elevadas próximas a 60 GHz com o arranjo de antenas *patch* com fenda, gerar polarização circular ou reconfigurar a polarização das antenas, [11]-[13].

Outros estudos aproveitam a assimetria das antenas para obter uma ou mais características específicas. Como exemplo, a assimetria das fendas aplicadas em antena *patch* pode permitir a sintonia em multibanda para WLAN e WMAN, [14].

2.2 Bandas de Frequências para Telefonia Móvel

O rápido crescimento das comunicações móveis e a demanda por mais taxas de transferência de dados fizeram com que levaram ao surgimento de novas tecnologias de comunicações sem fio. As tecnologias passaram de analógicas para digitais com o surgimento

dos sistemas GSM/2G, 3G, 4G/LTE e, atualmente, 5G. Desse modo, foi necessário fazer adaptações no espectro de frequências para alocar os novos serviços.

Em 11 de Dezembro de 2006, a Anatel por determinação da Resolução nº 454 aprovou a regulamentação sobre as condições de uso de radiofrequências nas faixas de 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz e 2100 MHz, sem exclusividade. A atualização da Resolução nº 454 foi realizada revogando e adicionando artigos ou trechos com as Resoluções nº 647 (9 de Fevereiro de 2015), nº 657 (3 de Novembro de 2015) e nº 703 (1 de Novembro de 2018), [6], [15]-[17]. Desse modo, a Resolução nº 657 autorizou a prestação de Serviços Móveis Pessoais, SMP, para as subfaixas de 898,5 a 901,0 MHz; de 907,5 a 910,0 MHz; de 943,5 a 946,0 MHz e de 952,5 a 955,0 MHz, [16].

A subfaixa A' foi incluída por meio da Resoluções nº 647, de 9 de Fevereiro de 2015. Permitindo as operações de transmissões das estações móveis na faixa de 806 a 821 MHz e das ERBs na faixa de 851 a 866 MHz, [15].

Existe uma observação de que não é permitido operações de sistemas analógicos nas faixas de radiofrequências presentes na Resoluções nº 647, [6], [18]. A Tabela 2.1 apresenta as subfaixas de frequências para SMP, Serviço Móvel Pessoal, para transmissões das estações móveis e das ERBs, [6], [15]-[17].

Tabela 2.1: Subfaixas de frequências para SMP.

	Transmissão da Estação Móvel (MHz)	Transmissão da Estação Rádio Base (MHz)
Subfaixa A'	806,0 - 821,0	851,0 - 866,0
Subfaixa B	851,0 - 835,0	869,0 - 880,0
	854,0 - 846,5	890,0 - 891,5
Subfaixa D'	910,0 - 912,5	955,0 - 957,5
Subfaixa D	1710,0 - 1725,0	1805,0 - 1820,0
Subfaixa E'	912,5 - 915,0	957,5,0 - 960,0
Subfaixa E	1740,0 - 1755,0	1835,0 - 1850,0
Subfaixa F	1920,0 - 1935,0	2110,0 - 2125,0
Subfaixa G	1935,0 - 1945,0	2125,0 - 2135,0
Subfaixa H	1945,0 - 1955,0	2135,0 - 2145,0
Subfaixa I	1955,0 - 1965,0	2145,0 - 2155,0
Subfaixa J	1965,0 - 1975,0	2155,0 - 2165,0
Subfaixa L	1895,0 - 1900,0	1975,0 - 1980,0
Subfaixa M	1755,0 - 1765,0	1850,0 - 1860,0

Fonte: [6],[15].

As faixas de frequências de 850 MHz e de 900 MHz, que abrangem as bandas A e B, são utilizadas pelo GSM. E as faixas de 1700 MHz e de 1800 MHz, abrangendo as bandas D e E são utilizadas tanto para o GSM quanto para os sistemas 3G.

A maior parte das frequências nas faixas de 1900 MHz e de 2100 MHz são destinadas para sistemas 3G, enquanto que os sistemas 4G/LTE tem autorização de operar nas bandas de 700 MHz e 2500 MHz. Com a Resolução nº 640, de 11 de julho de 2014, foram

aprovadas as condições de convivência entre os serviços de radiodifusão de sons e imagens com o sistema de 4G/LTE, operando na faixa de 698 MHz a 806 MHz, [19].

A Anatel permite o uso das subfaixas de extensões, apresentadas na Tabela 2.2. Essas poderão ser concedidas como faixas para prestação de atendimento nas áreas em que não possuam subfaixas de frequências disponíveis.

Tabela 2.2: Subfaixas de extensões de frequências para SMP.

	Transmissão da Estação Móvel (MHz)	Transmissão da Estação Rádio Base (MHz)
Subfaixas de Extensão	898,5 a 901,0	943,5 a 946,0
	907,5 a 910,0	952,5 a 955,0
	1725,0 a 1727,5	1820,0 a 1822,5
	1727,5 a 1730,0	1822,5 a 1825,0
	1730,0 a 1732,5	1825,0 a 1827,5
	1732,5 a 1735,0	1827,5 a 1830
	1735,0 a 1737,5	1830,0 a 1832,5
	1737,5 a 1740,0	1832,5 a 1835,0
	1765,0 a 1770,0	1860,0 a 1865,0
	1770,0 a 1775,0	1865,0 a 1870,0
	1775,0 a 1777,5	1870,0 a 1872,5
	1777,5 a 1780,0	1872,5 a 1875,0
	1780,0 a 1782,5	1875 a 1877,5
	1782,5 a 1785,0	1877,5 a 1880,0
		1885,0 a 1890,0
	1890,0 a 1895,0	

Fonte: [6].

2.3 Bandas de Frequências para Redes Locais sem Fio

Na década de 1990, a marca Wi-Fi foi criada pela *Wireless Ethernet Compatibility Alliance*, WECA, organização sem fins lucrativos. Com a missão de certificar a interoperabilidade de produtos que usam redes sem fio locais utilizando o padrão IEEE 802.11[®].

Esse padrão vem sendo amplamente estudado, gerando aplicações, melhorias nas comunicações e no desenvolvimento de novos produtos. Como exemplo, tem-se o desenvolvimento de módulo *Front-End* para aplicações em sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), partindo do princípio de multicamadas nas redes, [20].

Outras pesquisas focam na economia de energia, assim permitindo maior autonomia dos equipamentos portáteis móveis, como o estudo voltado para aplicações de transmissões de áudio e vídeo com baixo consumo energético, [7], [8].

Ademais, é possível melhorar a qualidade do tráfego das informações e otimizar as operações nos APs, do inglês *Access Points*, AP, a partir de estudos dos ruídos interferentes presentes em redes sem fio locais, [21]-[23].

2.3.1 Banda de Frequências em 2,4 GHz

As recomendações para conexões WLAN são descritas na especificação IEEE Std 802.11[®]-2016, na qual a Tabela 2.3 apresenta os canais para a banda de 2,4 GHz, [24].

Tabela 2.3: Plano de canais e frequências para DSSS PHY.

Identificação do canal	Frequência em MHz	Identificação do canal	Frequência em MHz
1	2412	8	2447
2	2417	9	2452
3	2422	10	2457
4	2427	11	2462
5	2432	12	2467
6	2437	13	2472
7	2442	14	2484

Fonte: [24].

Mais tarde, o IEEE desenvolveu o padrão IEEE 802.11b[®] se baseando nas pesquisas do modelo OSI. Assim, operando em 2,4 GHz e obtendo o aumento da eficiência espectral e da taxa de dados com valores médios de 5 Mbit/s para os sistemas em que o padrão foi aplicado, [25].

A evolução do padrão fez surgir o 802.11g[®], operando a uma taxa de 11 a 54 Mbit/s aplicadas com Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais, OFDM. Com isso, a eficiência do espectro melhorou, minimiza interferências e reduz distorções por multipercurso. Ao mesmo tempo, ofereceu compatibilidade com o IEEE 802.11b[®] e facilitando a evolução do sistema sem que houvesse grandes modificações no sistema, [26].

O padrão IEEE 802.11n foi o primeiro padrão de comunicações sem fio para WLAN que apresentou suporte para sistemas MIMO operando nas bandas de 2,4 ou 5 GHz, [27]. Atualmente, é o padrão mais aceito no Brasil, que definiu a faixa de 2400,0 a 2483,5 MHz para o uso de redes locais sem fio na banda de 2,4 GHz, [28], [29].

2.3.2 Banda de Frequências em 5 GHz

O padrão IEEE 802.11a[®] foi uma emenda às especificações do IEEE 802.11[®]. Foram definidos os requisitos para sistemas de comunicações OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, para bandas de frequências em 5 GHz: de 5,150 a 5,250 GHz; de 5,250 a 5,350 GHz e de 5,725 a 5,825 GHz, [30].

Esse padrão permite taxas de transferência de dados de 20 até 54 Mbit/s e com o número maior de usuários simultâneos. Outra vantagem de aplicação foi o aumento do número de pontos de acesso. Além de, caso, ultrapasse a distância de 30 metros entre estações, pode haver repetição da frequências. Semelhante ao conceito de células

de comunicações aplicadas em telefonia celular. Ademais, o nível de interferência foi reduzido, [31].

A Anatel assegura pela Resolução nº 680, de 27 de Junho de 2017, a permissão dos usos das faixas de 5,150 a 5,350 GHz e de 5,460 até 6,650 GHz utilização em operações de radiofrequências por equipamentos de radiação com limitações de emissão no Brasil, [28], [29].

2.4 Bandas de Frequências para WMAN em 3,5 GHz

O WiMAX foi formado por empresas de equipamentos e componentes pela corporação sem fins lucrativos WiMAX Fórum. Com a proposta de conectar as residências e as corporações da Internet com tecnologia sem fio e banda larga, unindo longo alcance com altas taxas de transmissão, [32], [33].

Os sistemas WMAN têm a capacidade de conectar grandes áreas geográficas a uma ERB sem que haja custo alto de infraestrutura. Além de possuir o *backbone* da rede formada por estações base com sistemas de controle e esse é o responsável pela transmissão e recepção das informações das estações móveis ou dispositivos. Ademais, os sistemas WMAN (IEEE 802.16[®]) permitem a implantação de BWA, *Broadband Wireless Access*, com reduções de custos e tempo. Esses são fatores que permitem ao padrão IEEE 802.16[®] oferecer maior mobilidade e banda larga para seus usuários. Desse modo, podendo fornecer acesso à rede mundial de computadores em localidades rurais de difícil acesso onde o serviço cabeado não tem atendimento ou é deficitário, [32], [33].

Porém as aplicações de WMAN estão além das transmissões informações comuns. Sistemas WMAN podem ser usados para fazer o monitoramento ambiental, prevenção de incêndios e telemedicina, [34]. Laboratórios foram elaborados para fomentar os estudos e aplicações na área de WMAN, como exemplo em aplicações de sistemas de antenas distribuídas, [35], [36].

Para melhorar as operações nas aplicações em WMAN, alguns padrões foram elaborados. Entre eles está o padrão IEEE 802.16.1[®], com adição de algumas emendas ao anterior. Outra é a emenda IEEE 802.16.1a[®]-2013, a qual tem o objetivo de definir a confiabilidade das interfaces das operações entre estações móveis e ERBs e das operações entre estações móveis. Para isso, essa emenda define com deve ocorrer o gerenciamento das rotas e como devem ser definidas as rotas alternativas, caso seja necessário, [37], [38].

Também foi aplicado a emenda IEEE 802.16b[®]-2012, em que é descrito o suporte entre máquinas. Essa emenda permite habilitar aplicações entre máquinas nas quais as comunicações do dispositivo exigem cobertura em área ampla e sem fio operando em bandas licenciadas. Além de permitir a automação para fins de controle, observação, alguns protocolos de MAC. Ademais, inclui melhorias em MAC e modificações de PHY para suporte de menor consumo de energia nos dispositivos, maior número de dispositivos

suportado pela estação base e maior eficiência em autenticação de dispositivos, [39].

Outra emenda é a IEEE 802.16.2[®], que especifica as operações em sistemas ponto-a-ponto na faixa de frequências de 10 GHz a 66 GHz, além da coexistência entre os sistemas FBWA, *Fixed Broadband Wireless Access*, operando em bandas licenciadas dentro da faixa de frequências de 2 a 11 GHz, [40]

A emenda IEEE 802.16.2[®] também atende e fornece as diretrizes da coexistência entre proprietários de licenças, provedores de serviços, grupos de implantação e integradores de sistema. Essas especificações facilitam a implantação e operação dos sistemas FBWA. Com isso, minimizando a necessidade de coordenação caso a caso. Além de apresentar ênfase nas bandas de frequências de 3,5 GHz, 10,5 GHz, e de 23,5 a 43,5 GHz, [40].

Além disso, apresenta a definição do raio de atuação máximo para as bandas para 3,5 GHz e 10,5 GHz é de 7 km. Ademais, as larguras de bandas de frequências dos canais, em que para a banda de 3,5 GHz, a largura de banda é de 7 MHz e para a banda de 10,5 GHz, é de 5 MHz, [40].

A partir do padrão IEEE 802.16[®], cada país define as faixas e bandas do espectro destinadas ao WMAN. Essas faixas podem licenciadas ou isentas de licença, sendo que as licenciadas possuem maior controle de acesso. A faixa mais aceita é a de 3,3 até 3,8 GHz e principalmente para 3,4 a 3,6 GHz. Entretanto, também é possível ser encontrado operações nas faixas de 2,50 a 2,69 GHz e de 5,25 a 5,85 GHz.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

3.1 Curvas Cáusticas e Polares

3.1.1 Curvas Cáusticas

As curvas cáusticas são geradas por raios de luz refletidos (curvas catacáusticas) ou refratados (curvas diacáusticas). O envelope luminoso que define a curva pode ser formado por bordas brilhantes ou sombras, [41].

Quando o envelope luminoso for gerado por raios refletidos, tem-se curvas cáusticas por reflexões ou curvas catacáusticas. Como exemplos de curvas catacáusticas, quando a fonte de luz está a uma distância finita, têm-se cardioides, nefroides, espiral logarítmica, parábola semicúbica, entre outras. E quando a fonte de luz está a uma distância infinita e com o auxílio de instrumentos ópticos para modificá-la, têm-se como exemplos curvas de perseguição, astroides e catenárias, [42].

As curvas geradas a partir de raios refratados são chamadas de curvas cáusticas por refração ou curvas diacáusticas. Também existem outros tipos de curvas cáusticas, entre elas a curva ortocáustica, em que o envelope é perpendicular ao raio emitido, [42].

Dependendo de como o raio luminoso seja refletido ou refratado, pode ser formada uma ponta que concentra a luz, chamada de cúspide. A formação da cúspide depende de alguns fatores como posição do foco da luz, índices de refração dos meios em questão e o meio em que ocorre a refração ou reflexão.

3.1.2 Curvas Cardioides

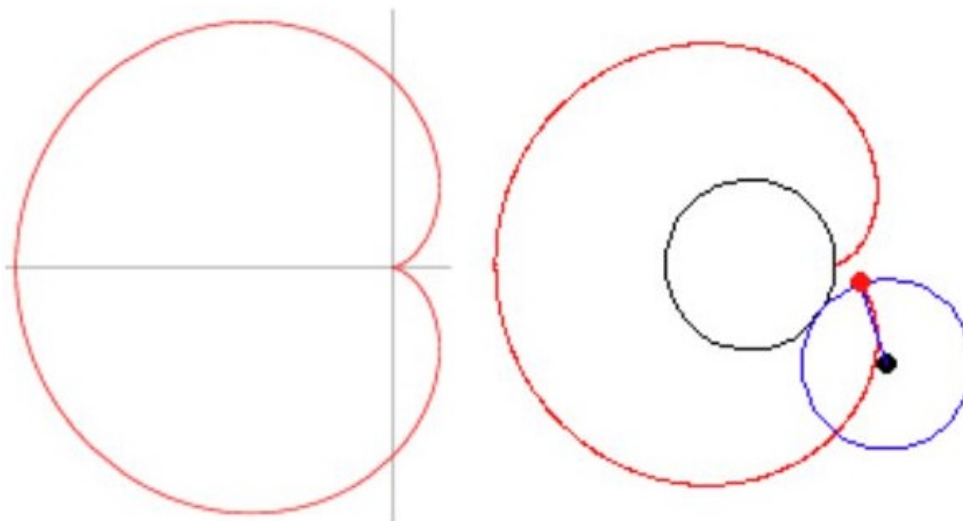
O cardioide pode ser definida como uma curva epicicloide que têm formação de uma circunferência fixa de raio A e outra de mesmo raio A girando tangente à circunferência fixa, como mostrado na Figura 3.1. Com a presença de uma cúspide localizada na origem da curva cardioide, [43].

A sua forma paramétrica, representadas por $x_{car}(t)$ e $y_{car}(t)$, é dada conforme (3.1) e (3.2).

$$x_{car}(t) = A \cos(t) (1 - \cos(t)) \quad (3.1)$$

$$y_{car}(t) = A \sin(t) (1 - \cos(t)) \quad (3.2)$$

Figura 3.1: Geração de curva cardioide como uma epicicloide.



Fonte: [43].

Outra modo de apresentar o cardioide é por meio da forma cartesiana, apresentado por (3.3).

$$(x^2 + y^2 + Ax)^2 = A^2(x^2 + y^2) \quad (3.3)$$

Partindo de (3.4), o raio r do cardioide pode ser descrito segundo (3.5), considerando $A = 1$.

$$r^2 = (0 - \cos(\theta))^2 + (1 - \sin(\theta))^2 \quad (3.4)$$

$$r = \sqrt{2(1 - \sin(\theta))} \quad (3.5)$$

Além de que é possível formar uma curva cardioide a partir de curvas cáusticas, por exemplo, de uma circunferência. A circunferência pode gerar quatro tipos de curvas catacáusticas dependendo da localização da fonte de luz localizado no ponto $(\mu, 0)$. Considerando que a fonte de luz está em cima da circunferência quando $\mu = A$ para uma circunferência de raio A . Caso $\mu < A$, a fonte está dentro da curva e se $\mu > A$, a fonte fora da circunferência, [44].

Quando o fonte de luz estiver na circunferência, ou seja, $\mu = A$, quando A for o raio da circunferência de base, é gerado uma curva catacáustica por reflexão na forma de cardioide.

A Figura 3.2 apresenta um cardioide gerada por reflexão em uma superfície metálica, apresentando a cúspide com maior intensidade luminosa do que outros lugares.

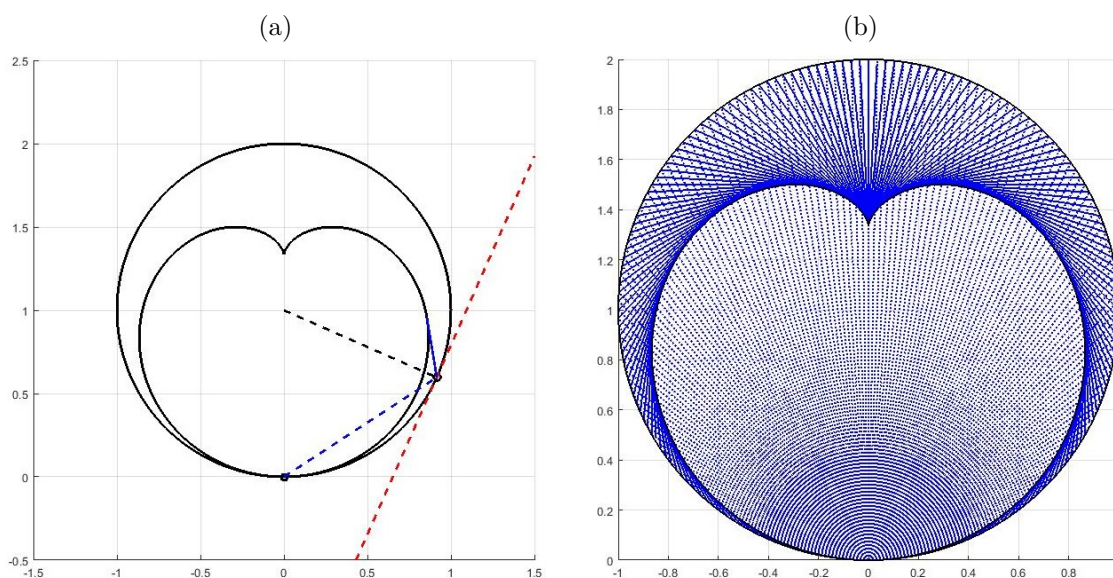
Figura 3.2: Geração de curva catacáustica (cardioide) de uma circunferência por reflexão da luz em superfície metálica.



Fonte: arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.1736.pdf.

Enquanto que as Figuras 3.3(a) e 3.3(b), confirmam matematicamente a geração de um cardioide a partir da tangência de raios refletidos com auxílio do MATLAB®.

Figura 3.3: Geração da curva catacáustica (cardioide) de uma circunferência por: (a) simulação simplificada em MATLAB®; (b) simulação em MATLAB® com presença das retas tangentes.



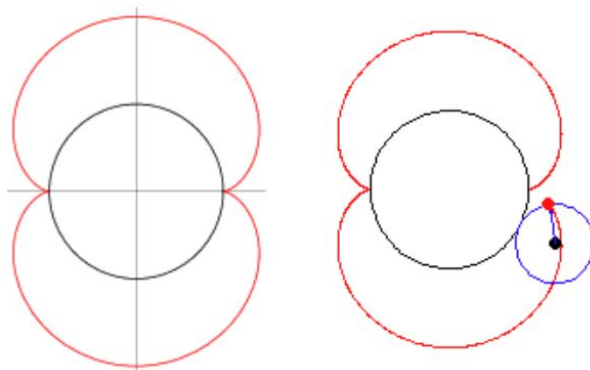
Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020¹.

¹ O programa desenvolvido em MATLAB® para a geração da curva catacáustica (cardioide) de uma circunferência foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

3.1.3 Curvas Nefroides

As nefroides podem ser descritas como epicicloides em que uma circunferência girante de raio A circula em torno de uma circunferência fixa de raio $2A$ com um ponto de tangência, como mostrado na Figura 3.4. Isso faz com que apresente duas cúspides, uma delas sendo na origem e a outra 180° de diferença angular, [45].

Figura 3.4: Geração de curva nefroide como uma epicicloide.



Fonte: [45].

Fisicamente, uma forma de gerar uma nefroide é posicionar o ponto radiante na cúspide de um cardioide, como foi gerada no século XVII e publicado no *Traité de la Lumière*, Tratado sobre a Luz, sendo representada por (3.6) e (3.7). E um dos exemplos de aplicação, na época, era o visor do capacete de cavaleiros medievais, em que é usado um arco de nefroide, [46].

$$x = A(3\cos(t) - \cos(3t)) \quad (3.6)$$

$$y = A(3\sin(t) - \sin(3t)) \quad (3.7)$$

A expressão dada por (3.8) é outra maneira de escrever (3.7).

$$y = 4A\sin^3(t) \quad (3.8)$$

Para a nefroide tem-se (3.9), a qual tem origem da epicicloide. Sabendo que r é o raio da nefroide para um ângulo t e o raio A da circunferência girante equivale a metade do raio $2A$ da circunferência fixa, [45], [47].

$$r^2 = \frac{A^2}{n^2} (n^2 + 2n + 2 - 2(n+1)\cos(nt)) \quad (3.9)$$

Considerando o número n de cúspides igual a dois, tem-se (3.10).

$$r^2 = \frac{A^2}{2} (5 - 3\cos(2t)) \quad (3.10)$$

Sabendo que o valor de t pode ser conseguido a partir de $tg(t)$ descrito por (3.11).

$$tg(t) = \frac{3\sin(t) - \sin(3t)}{3\cos(t) - \cos(3t)} \quad (3.11)$$

Então, (3.12) pode ser utilizada para definir a nefroide.

$$\left(\frac{r}{2A}\right)^{\frac{2}{3}} = \left(\text{sen}\left(\frac{t}{2}\right)\right)^{\frac{2}{3}} + \left(\text{cos}\left(\frac{t}{2}\right)\right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.12)$$

Também pode ser representada por (3.13) e (3.14).

$$x_{nef}(t) = A(3\text{cos}(t) - \text{cos}(3t)) \quad (3.13)$$

$$y_{nef}(t) = A(3\text{sen}(t) - \text{sen}(3t)) \quad (3.14)$$

Outra forma de escrever (3.14) é por meio de (3.15).

$$y_{nef}(t) = 4A\text{sen}^3(t) \quad (3.15)$$

A forma cartesiana da nefroide é dada conforme (3.16).

$$\left(x_{nef}^2 + y_{nef}^2 - 4A^2\right)^3 = 108A^4y_{nef}^2 \quad (3.16)$$

3.1.4 Nefroide como Curva Catacáustica do Cardioide e da Circunferência

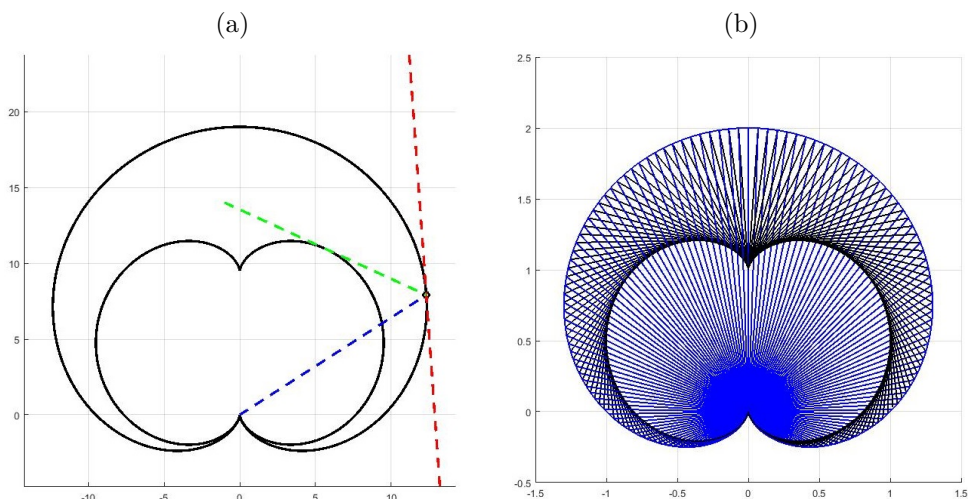
Também se pode gerar uma curva catacáustica de um cardioide (nefroide), ocorre quando o ponto focal está na cúspide da curva cardioide, [45], [47]. Matematicamente, é possível descrever uma curva nefroide por (3.17) e (3.18).

$$x_{nef}(t) = \left(\frac{1}{4}\right)(2 + 3\text{cos}(t) - \text{cos}(3t)) \quad (3.17)$$

$$y_{nef}(t) = \text{sen}(3t) \quad (3.18)$$

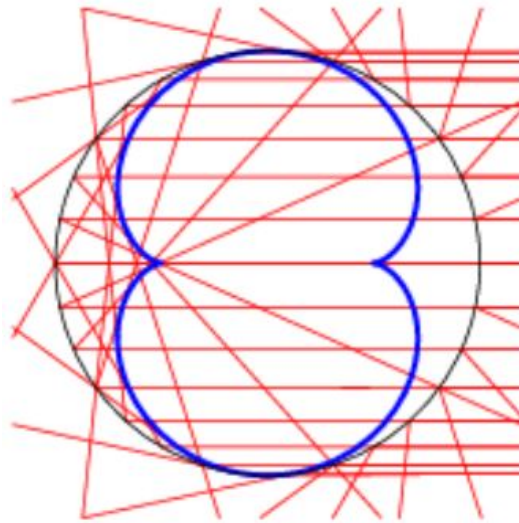
A Figura 3.5 ilustra a simulação da curva catacáustica do cardioide com o ponto focal na cúspide (nefroide) por simulação em MATLAB®.

Figura 3.5: Geração da curva catacáustica (nefroide) de um cardioide por: (a) simulação simplificada em MATLAB®; (b) simulação em MATLAB® com presença das retas tangentes.



Outra modo de gerar uma nefroide a partir de curvas catacásticas é por meio da circunferência. Quanto o foco dos raios está no infinito, $\iota = +\infty$, é possível gerar uma banda de uma nefroide e, quando realizado um deslocamento de π radianos, gera-se a outra banda da curva. A Figura 3.6 ilustra a geração de curva catacástica da circunferência (nefroide) quando $\iota = +\infty$.

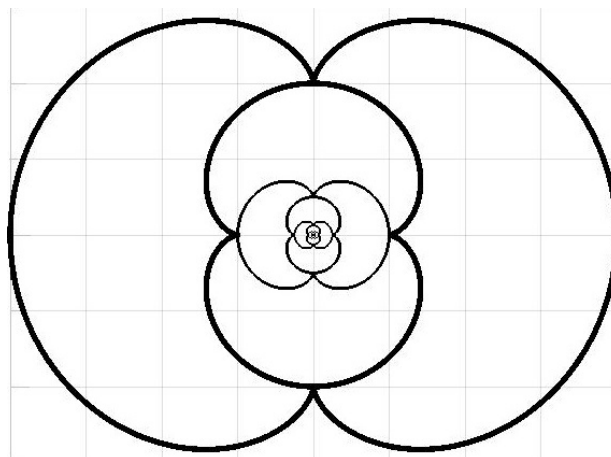
Figura 3.6: Geração de curva catacástica da circunferência (nefroide) com o foco no infinito.



Fonte: [44].

Isso implica que é possível gerar nefroides dentro de uma curva nefroide se considerar que pode ser descrito, matematicamente, uma circunferência formada pelas duas cúspides da curva. A Figura 3.7 mostra a formação de nefroides internamente a uma nefroide maior.

Figura 3.7: Curvas nefroides geradas internamente em nefroides.



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020³.

² O programa desenvolvido em MATLAB[®] para geração da curva catacástica (nefroide) de um cardioides foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Sendo A o raio da circunferência para a geração da curva nefroide, (3.19) e (3.20) define a próxima nefroide interna.

$$x_{nef}(t) = \frac{A}{4} \left(3\cos(t) - \cos(3t) \right) \quad (3.19)$$

$$y_{nef}(t) = \frac{A}{4} \left(3\sin(t) - \sin(3t) \right) \quad (3.20)$$

3.2 Equações das Antenas *Patch* Cardioide com Fendas Catacáusticas

3.2.1 Equações do *Patch* para Elemento Irradiante Cardioide

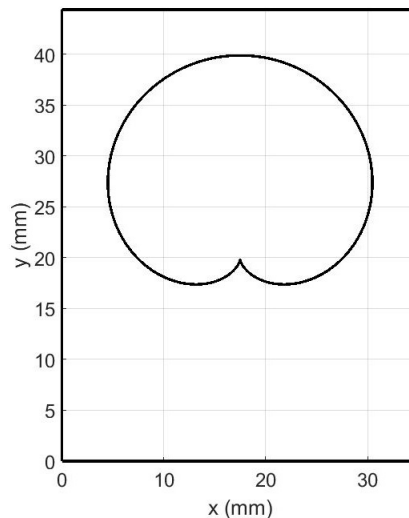
Para gerar o *patch* é necessário modificar (3.1) e (3.2) do cardioide e sendo representada por (3.21) e (3.22). Em que A representa o raio da circunferência base para a curva polar; $x_{car}(t)$ é a abscissa da curva cardioide; e $y_{car}(t)$ é a ordenada da curva cardioide.

$$x_{car}(t) = A\sin(t)(1 + \cos(t)) \quad (3.21)$$

$$y_{car}(t) = A\cos(t)(1 + \cos(t)) \quad (3.22)$$

A Figura 3.8 apresenta a curva cardioide gerada por (3.21) e (3.22).

Figura 3.8: Exemplo de *patch* cardioide desenhado em MATLAB®.



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020⁴.

³ O programa desenvolvido em MATLAB® para geração de curvas nefroides internamente em nefroides foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

⁴ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de exemplo de leiaute *patch* cardioide foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

3.2.2 Equações da Fenda para Elemento Irradiante Cardioide

A partir de (3.19) e (3.20), obteve-se (3.23) e (3.24) para a formação nefroide superior. E para a nefroide inferior é usado a variável w_f , que é utilizada para gerar espessura da fenda, para causar um deslocamento e, conseqüentemente, uma nova nefroide representada por (3.25) e (3.26). A variável w_f é diferença entre os raios das circunferências base para a formação da fenda catacústica; $x_{1.fenda.nef}(t)$ é a abcissa da curva superior formadora da fenda catacústica em função do ângulo t ; $y_{1.fenda.nef}(t)$ é a ordenada da curva superior formadora da fenda catacústica em função do ângulo t ; $x_{2.fenda.nef}(t)$, abcissa da curva inferior formadora da fenda catacústica em função do ângulo t ; e por fim, $y_{2.fenda.nef}(t)$, ordenada da curva inferior formadora da fenda catacústica em função do ângulo t .

$$x_{1.fenda.nef}(t) = A \operatorname{sen}^3(t) \quad (3.23)$$

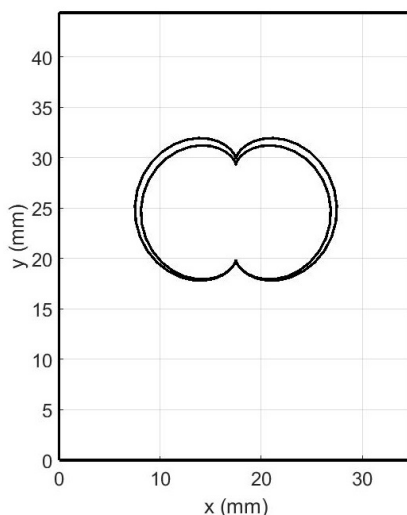
$$y_{1.fenda.nef}(t) = \left(\frac{A}{4}\right) (2 + 3\cos(t) - \cos(3t)) \quad (3.24)$$

$$x_{2.fenda.nef}(t) = (A - w_f) \operatorname{sen}^3(t) \quad (3.25)$$

$$y_{2.fenda.nef}(t) = \left(\frac{A - w_f}{4}\right) (2 + 3\cos(t) - \cos(3t)) \quad (3.26)$$

Quando aplicadas no código que gera o formato das antenas no MATLAB[®] tem-se a Figura 3.9, que representa a fenda completa. Entretanto, o tamanho da fenda depende do ângulo t .

Figura 3.9: Exemplo de fenda catacústica de cardioide (nefroide) completa desenhada em MATLAB[®].

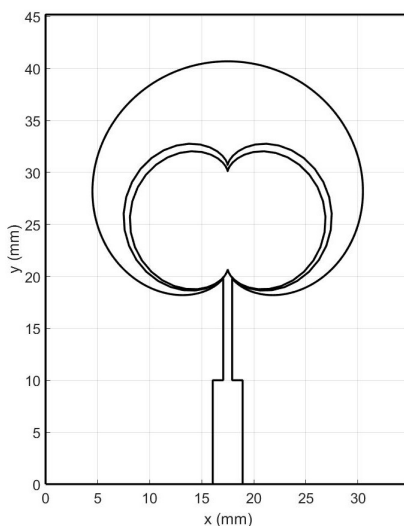


Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020⁵.

⁵ O programa desenvolvido em MATLAB[®] para obtenção de exemplo de leiaute de fenda catacústica de cardioide (nefroide) completa foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Ao unir o *patch* e a fenda com o transformador de quarto de onda e a linha de microfita, obtém-se a antena *patch* cardioide, exemplificada na Figura 3.10.

Figura 3.10: Exemplo de leiaute da antena *patch* cardioide com fenda catacústica (nefroide) completa desenhada em MATLAB®.



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020⁶.

3.2.3 Cálculo do Comprimento da Curva da Fenda do Cardioide

Para calcular o comprimento da fenda, foi utilizada integral do comprimento de arco. Partindo das equações de uma curva qualquer, sabe-se que o comprimento de uma curva é dado por (3.27) e (3.28), [48].

$$dl = \sqrt{dx(t)^2 + dy(t)^2} \quad (3.27)$$

$$L = \int_a^b dl \quad (3.28)$$

E sabendo que a função do comprimento, $\vec{s}(t)$, representa da curva parametrizada, apresentado em (3.29), dl pode ser reescrito em função do parâmetro t como mostra (3.30).

$$\vec{s}(t) = x(t)\hat{i} + y(t)\hat{j} \quad (3.29)$$

$$dl(t) = \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2} \quad (3.30)$$

Partindo desse princípio que também é possível estabelecer uma relação entre o tamanho da fenda com as frequências de ressonância das antenas *patch* baseadas em curvas

⁶ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de exemplo de leiaute da antena *patch* cardioide com fenda catacústica (nefroide) completa foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

polares. Transformando (3.30) em uma função que representada por (3.31).

$$L(t) = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2} dt \quad (3.31)$$

Como é necessário duas nefroides para gerar uma fenda, é usado a média da circunferência base do *patch*, A , com $A - w_f$, em que w_f , representa a variação dos raios das circunferências bases da fenda. Desse modo, gera-se (3.32) e (3.33). Essas são utilizadas para calcular o tamanho do arco da curva catacústica do cardioide (nefroide).

$$x_{med.fen.nef}(t) = \left(A - \frac{w_f}{2}\right) sen^3(t) \quad (3.32)$$

$$y_{med.fen.nef}(t) = \frac{1}{4} \left(A - \frac{w_f}{2}\right) (2 + 3cos(t) - cos(3t)) \quad (3.33)$$

Considerando que $\left(A - \frac{w_f}{2}\right)$ é uma constante para cada umas das antenas elaboradas. Ao realizar o procedimento de derivação, obtém-se (3.34) e (3.35), em relação a t .

$$\frac{dx(t)}{dt} = 3 \left(A - \frac{w_f}{2}\right) sen^2(t) cos(t) \quad (3.34)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{3}{4} \left(A - \frac{w_f}{2}\right) (sen(3t) - sen(t)) \quad (3.35)$$

Substituindo (3.34) e (3.35) em (3.31), obtém-se (3.36). Nessa equação é descrita a reposta do comprimento $L_{fenda.nef}(t)$ do arco da curva catacústica.

$$L_{fenda.nef}(t) = \int_{-\pi/\theta_f}^{\pi/\theta_f} \left(\left(3 \left(A - \frac{w_f}{2}\right) sen^2(t) cos(t) \right)^2 + \left(\frac{3}{4} \left(A - \frac{w_f}{2}\right) (sen(3t) - sen(t)) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.36)$$

Ao realizar a manipulação algébrica em (3.36), obtém-se (3.37).

$$L_{fenda.nef}(t) = 3 \left(A - \frac{w_f}{2}\right) \int_{-\pi/\theta_f}^{\pi/\theta_f} \left((sen^2(t) cos(t))^2 + \left(\frac{1}{4} (sen(3t) - sen(t))\right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.37)$$

3.3 Equações das Antenas *Patch* Nefroide com Fendas Catacústicas

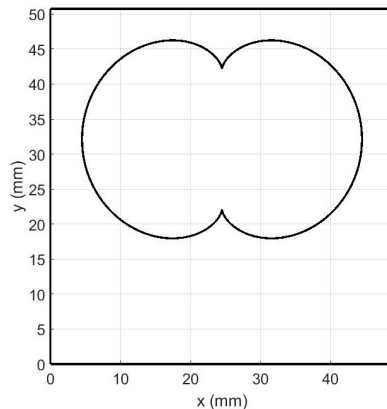
3.3.1 Equações do *Patch* para Elemento Irradiante Nefroide

O *patch* em formato de nefroides usados para a fabricação das antenas são descritos por (3.38) e (3.39). Sua representação gráfica é apresentada na Figura 3.11.

$$x_{nef}(t) = A(3cos(t) + cos(3t)) \quad (3.38)$$

$$y_{nef}(t) = A(3sen(t) + sin(3t)) \quad (3.39)$$

Figura 3.11: Exemplo de *patch* nefroide desenhado em MATLAB®.



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020⁷.

3.3.2 Equações da Fenda para Elemento Irradiante Nefroide

Duas curvas são utilizadas para gerar uma fenda catacústica. A primeira delas é gerada a partir de (3.40) e (3.41).

$$x_{1.fenda.nef}(t) = A(3\cos(t) - 2\cos^3(t)) \quad (3.40)$$

$$y_{1.fenda.nef}(t) = A(2\sen^3(t)) \quad (3.41)$$

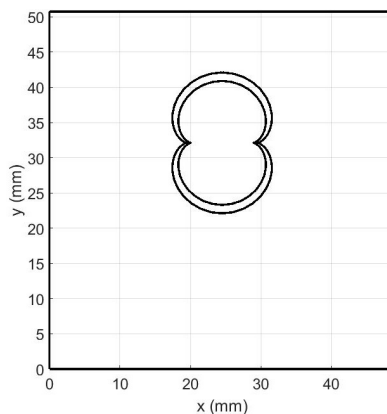
A segunda curva é uma nefroide descrita por (3.42) e (3.43).

$$x_{2.fenda.nef}(t) = (A - w_f)(3\cos(t) - 2\cos^3(t)) \quad (3.42)$$

$$y_{2.fenda.nef}(t) = (A - w_f)(2\sen^3(t)) \quad (3.43)$$

A partir de (3.40), (3.41), (3.42) e (3.43), é possível formar a fenda, ilustrado na Figura 3.12.

Figura 3.12: Exemplo de fenda catacústica completa da nefroide (nefroide) desenhada em MATLAB®.

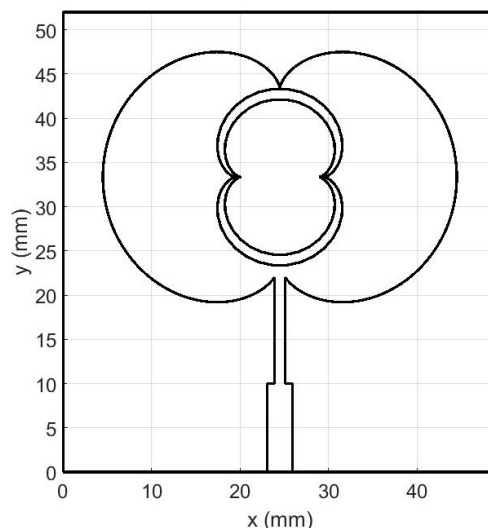


Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020⁸.

⁷ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de exemplo de leaiute de *patch* nefroide foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Ao unir o *patch* e a fenda com o transformador de quarto de onda e linha de microfita, obtém-se o exemplo da antena *patch* nefroide com fenda completa ilustrado na Figura 3.13, que é submetida às simulações.

Figura 3.13: Exemplo de leiaute de antena *patch* nefroide com fenda catacústica (nefroide) completa desenhada em MATLAB®.



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020⁹.

3.3.3 Cálculo do Comprimento da Curva da Fenda da Nefroide

Partindo de (3.31) e usando uma curva média entre as duas, pode-se descrever a curva que gerar o valor do comprimento do arco da nefroide por (3.44) e (3.45).

$$x_{med.fen.nef}(t) = \left(A - \frac{w_f}{2}\right) (3\cos(t) - 2\cos^3(t)) \quad (3.44)$$

$$y_{med.fen.nef}(t) = \left(A - \frac{w_f}{2}\right) (2\sen^3(t)) \quad (3.45)$$

Sabendo que $(A - w_f/2)$ é constante para cada um dos projetos realizados, as derivadas em relação a t são descritas por (3.46) e (3.47).

$$\frac{dx(t)}{dt} = \left(A - \frac{w_f}{2}\right) (-3\sen(t) + 6\cos^2(t)\sen(t)) \quad (3.46)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \left(A - \frac{w_f}{2}\right) (6\sen^2(t)\cos(t)) \quad (3.47)$$

⁸ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de exemplo de leiaute de fenda catacústica completa da circunferência interna de nefroide gerada pelas cúspides (nefroide) foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

⁹ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de exemplo de leiaute de antena *patch* nefroide com fenda catacústica da circunferência interna gerada pelas cúspides (nefroide) completa foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Manipulando algebricamente (3.46) e (3.47), obtêm-se (3.48) e (3.49).

$$\frac{dx(t)}{dt} = 3\left(A - \frac{w_f}{2}\right) \text{sen}(t) (2\cos^2(t) - 1) \quad (3.48)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = 6\left(A - \frac{w_f}{2}\right) (\text{sen}^2(t) \cos(t)) \quad (3.49)$$

Aplicando (3.48) e (3.49) em (3.31), obtêm-se (3.50).

$$L_{fenda.nef}(t) = \int_{-\pi/\theta_f}^{\pi/\theta_f} \left(\left(3\left(A - \frac{w_f}{2}\right) \text{sen}(t) (2\cos^2(t) - 1) \right)^2 + \left(6\left(A - \frac{w_f}{2}\right) (\text{sen}^2(t) \cos(t)) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.50)$$

Realocando as constantes, tem-se (3.51).

$$L_{fenda.nef}(t) = 3\left(A - \frac{w_f}{2}\right) \int_{-\pi/\theta_f}^{\pi/\theta_f} \left(\left(\text{sen}(t) (2\cos^2(t) - 1) \right)^2 + \left(2\text{sen}^2(t) \cos(t) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.51)$$

E realizando a simplificação algébrica dentro da integral, obtêm-se (3.52).

$$L_{fenda.nef}(t) = 3\left(A - \frac{w_f}{2}\right) \int_{-\pi/\theta_f}^{\pi/\theta_f} \text{sen}(t) \left((2\cos^2(t) - 1)^2 + (2\text{sen}(t) \cos(t))^2 \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.52)$$

3.4 Equações das Antenas *Patch* Circular com Fendas Catacáusticas

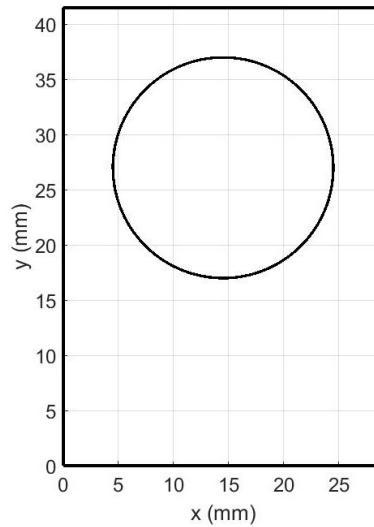
3.4.1 Equações do *Patch* para Elemento Irradiante Circular

O *patch* circular é descrito por (3.53) e (3.54). Um deslocamento é aplicado para que a origem do plano cartesiano fique na circunferência.

$$x_{cir} = A \cos(t) \quad (3.53)$$

$$y_{cir} = A \text{sen}(t) + A \quad (3.54)$$

A Figura 3.14 apresenta a circunferência gerada, a qual é aplicada no *patch* de exemplo desenhado MATLAB® em de formação da antena circular.

Figura 3.14: Exemplo de *patch* circular desenhado em MATLAB®.

Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020¹⁰.

3.4.2 Equações da Fenda para Elemento Irradiante Circular

Para gerar as fendas catacústicas, foram usadas duas curvas cardioides. A primeira delas é descrita por (3.55) e (3.56).

$$x_{1.fenda.car} = \frac{2A \operatorname{sen}(t)}{3} (1 + \cos(t)) \quad (3.55)$$

$$y_{1.fenda.car} = -\frac{2A \cos(t)}{3} (1 + \cos(t)) + \frac{4A}{3} \quad (3.56)$$

Enquanto que a segunda curva, é descrita por (3.57) e (3.58).

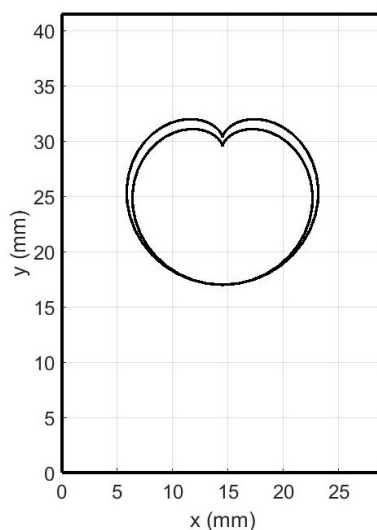
$$x_{2.fenda.car} = \frac{2(A - w_f) \operatorname{sen}(t)}{3} (1 + \cos(t)) \quad (3.57)$$

$$y_{2.fenda.car} = -\frac{2(A - w_f) \cos(t)}{3} (1 + \cos(t)) + \frac{4(A - w_f)}{3} \quad (3.58)$$

A Figura 3.15 ilustra um exemplo de fenda catacústica completa gerada por (3.55), (3.56), (3.57) e (3.58). As duas curvas formadoras da fenda se tangenciam apenas na origem.

¹⁰ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de exemplo de leiaute de *patch* circular foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

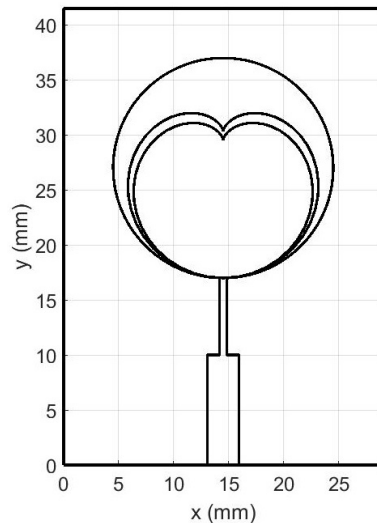
Figura 3.15: Exemplo de fenda catacústica de circunferência (cardioide) completa desenhada em MATLAB®.



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020¹¹.

A Figura 3.16 ilustra um exemplo de leiaute de antena *patch* obtida por *software*.

Figura 3.16: Exemplo de leiaute de antena *patch* circular com fenda catacústica (cardioide) completa desenhada em MATLAB®.



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020¹².

¹¹ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de exemplo de leiaute de fenda catacústica de circunferência (cardioide) completa foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

¹² O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de exemplo de leiaute de antena *patch* circular com fenda catacústica (cardioide) completa foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

3.4.3 Cálculo do Comprimento da Curva da Fenda para Circular

A curva que descreve o comprimento da fenda é dado pelo média de A e $A - w_f$, apresentada por (3.59) e (3.60). Em que $A - w_f/2$ representa o raio médio de uma circunferência com o mesmo ponto de tangência.

$$x_{med.fen.car} = \frac{2}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) (1 + \cos(t)) \operatorname{sen}(t) \quad (3.59)$$

$$y_{med.fen.car} = -\frac{2}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) (1 + \cos(t)) \cos(t) + \frac{4}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) \quad (3.60)$$

Sabendo que $(A - \frac{w_f}{2})$ é constante, isso implica que (3.59) e (3.60), quando derivadas, se transformam em (3.61) e (3.62).

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{2}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) (\cos^2(t) + \cos(t) - \operatorname{sen}^2(t)) \quad (3.61)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{2}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) (2\operatorname{sen}(t)\cos(t) + \operatorname{sen}(t)) \quad (3.62)$$

Aplicando em (3.31), tem-se que o comprimento $L_{fenda.car}(t)$ é dado por (3.63).

$$L_{fenda.car}(t) = \int_{-\pi/\theta_f}^{\pi/\theta_f} \left(\left(\frac{2}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) (\cos^2(t) + \cos(t) - \operatorname{sen}^2(t)) \right)^2 + \left(\frac{2}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) (2\operatorname{sen}(t)\cos(t) + \operatorname{sen}(t)) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.63)$$

Colocando as constantes para fora da integral, obtém-se (3.64).

$$L_{fenda.car}(t) = \frac{2}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) \int_{-\pi/\theta_f}^{\pi/\theta_f} \left((\cos^2(t) + \cos(t) - \operatorname{sen}^2(t))^2 + (2\operatorname{sen}(t)\cos(t) + \operatorname{sen}(t))^2 \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.64)$$

E por fim, simplificando, obtém-se (3.65).

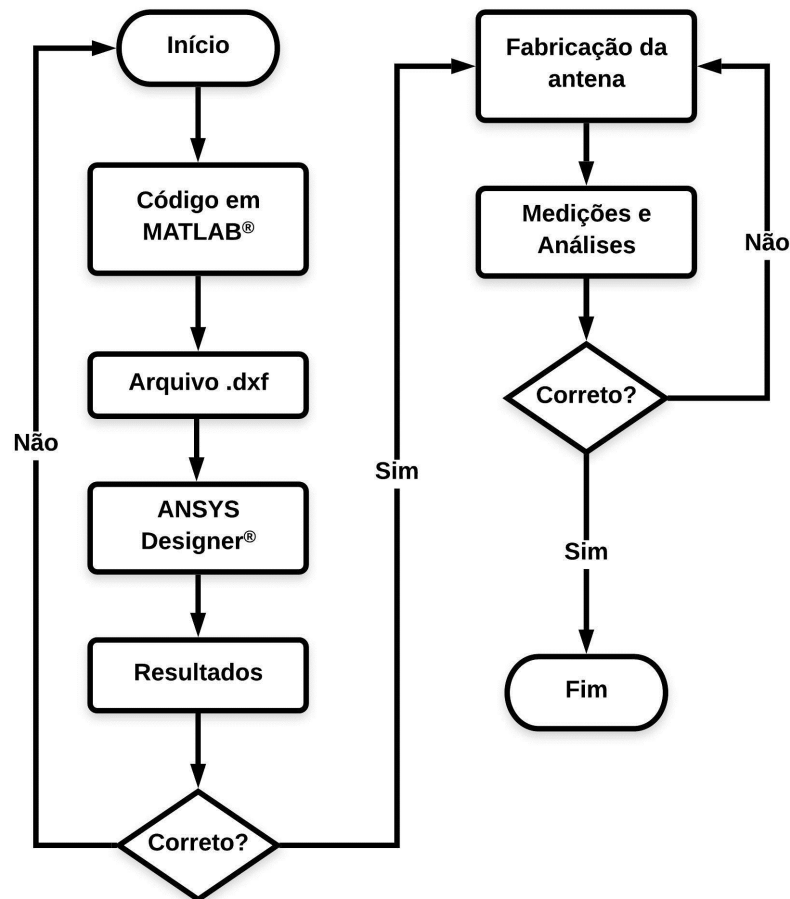
$$L_{fenda.car}(t) = \frac{2}{3} \left(A - \frac{w_f}{2} \right) \int_{-\pi/\theta_f}^{\pi/\theta_f} \left((\cos(t)(\cos(t) + 1) - \operatorname{sen}^2(t))^2 + (\operatorname{sen}(t)(2\cos(t) + 1))^2 \right)^{\frac{1}{2}} dt \quad (3.65)$$

Capítulo 4

Metodologia

A Figura 4.1 apresenta um diagrama em blocos da metodologia adotada. Todas antenas *patch* polares abordadas (cardioide, nefroide e circular) são elaborados via modelagem matemática da geometria do *patch* irradiante, da fenda catacústica das respectivas curvas polares, do transformador de quarto de onda e da linha de alimentação por microfita, que são desenhados, exclusivamente, com o auxílio do MATLAB®.

Figura 4.1: Diagrama em blocos da metodologia adotada.



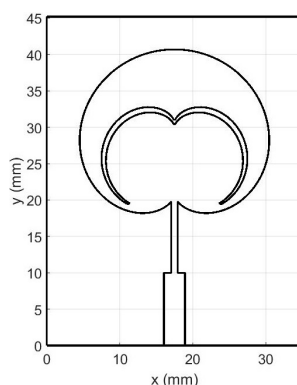
Fonte: Autoria própria, 2020.

Inicialmente, é executado o código no *software* MATLAB® para cada uma dos formatos, cardioide, nefroide e circular¹³. Como entradas, têm-se o raio A da circunferência base da estrutura que gera cada um dos elementos irradiantes, a largura W_{qwt} e comprimento L_{qwt} do transformador de quarto de onda utilizado para fazer os casamentos de impedâncias. Além dos valores de θ_f e $2\pi/\theta_f$, o qual define o ângulo de abertura das

fendas e, como consequência, o tamanho das fendas.

Como resultado da execução do código, obtém-se os dados em arquivos no formato *DXF* (do inglês *Drawing Exchange Format*), que é um formato de arquivo para intercâmbio desenhos assistidos por computador. Esses arquivos são exportados para o *software* ANSYS Designer[®]. A Figura 4.2 exemplifica uma antena *patch* cardioide genérica com sua respectiva fenda catacústica (nefroide) desenhada em MATLAB[®].

Figura 4.2: Exemplo de leiaute da antena *patch* cardioide com fenda desenhada em MATLAB[®].



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020¹⁴.

Os dados são exportados para o *software* ANSYS Designer[®] e realizada a simulação usando os parâmetros de projeto. Para as antenas *patch* cardioide, nefroide e circular, os parâmetros de simulações são de 1 GHz a 7 GHz para limites de frequências com amostragem a cada 1 MHz.

Caso o resultado simulado não seja satisfatório, esse é adicionado a um banco de dados para futuras análises. Esses dados são usados como base para a decisão de parâmetros futuros e resultados das antenas com alteração dos parâmetros.

Após esse procedimento, e se estiver de acordo com os valores desejados para esses parâmetros, frequências de ressonâncias, a largura de banda de interesse e módulo de coeficiente de reflexão, é realizada a exportação dos dados. O *software* escolhido para a geração dos arquivos de fabricação das antenas foi CorelDRAW[®].

As medições são realizadas com a antena fabricada em FR4 com 1,5 mm de altura, $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perda igual a 0,018. Os resultados medidos são gravados em arquivos e usados para fazer superposição de resultados com estudo comparativo. Por fim, é decidido se a antena é válida ou não de acordo com os fins de interesse. As antenas que não atenderem aos requisitos estabelecidos, especificados ou desejados nas medições são excluídas.

¹³ Os programas desenvolvidos em MATLAB[®] para as gerações dos leiautes de projetos das antenas dos tipos cardioide, nefroide e circular são restritos e foram cedidos, exclusivamente, para aplicações nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

¹⁴ O programa desenvolvido em MATLAB[®] para geração de exemplo de leiaute da antena *patch* cardioide com fenda foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Capítulo 5

Resultados

Devido à limitação da espessura do transformador de quarto de onda, W_{qwt} , para a fabricação das antenas *patch*, as frequências dos transformadores de quarto de onda de algumas antenas foram deslocadas para aliar casamentos de impedâncias e limitação física de fabricação. Desse modo pode ser realizada a viabilização de alguns projetos, quando necessário.

5.1 Antenas *Patch* Cardioide com Fendas Catacáusticas

As antenas *patch* cardioide apresentam resposta , predominantemente, em banda dupla. Além disso, apresentam suas fendas como partes de nefroides, em que o ponto médio da fenda é a cúspide superior. Sendo que quanto maior o valor de θ_f , menor é o tamanho da fenda. Assim, o uso da fenda possibilita o ajuste da primeira frequência de ressonância, que varia conforme o comprimento da fenda.

Como resposta, a banda de frequências superiores têm uma resposta que independe do comprimento da fenda catacáustica. Enquanto que a banda de frequências inferiores se desloca com o aumento do comprimento da fenda catacáustica. O valor máximo da banda inferior é limitado pela banda de frequências inferiores da antena *patch* sem a presença da fenda catacáustica.

5.1.1 Parâmetros de Projetos para Antenas *Patch* Cardioide

Os Projetos 1 e 2 têm suas frequências superiores projetadas para a banda de WLAN 5 GHz. Para obter o Projeto 2, o raio da circunferência base do Projeto 1, A , foi alterado e aplicado uma fenda catacáustica.

E para os Projetos 3 e 4, as frequências superiores foram projetadas para a banda de 3,5 GHz. Com o objetivo de melhorar a sintonia de frequências, o Projeto 3 teve uma alteração do raio da circunferência base e aplicação de fenda para obter o Projeto 4.

A Tabela 5.1 apresenta os valores dos parâmetros geométricos utilizados nos Projetos de 1 a 4 para obtenção dos leiautes das antenas *patch* cardioide com auxílio de *software*. Em que A é o raio da circunferência base para gerar o elemento irradiante e a fenda catacáustica. $L_{fenda.nef}$ é o comprimento da fenda catacáustica do cardioide (nefroide) e w_f é a variável que determina a espessura da fenda. O ângulo de abertura da fenda é representado pela variável $2\pi/\theta_f$. L_{qwt} e W_{qwt} são o comprimento e a largura do trans-

formador de quarto de onda, respectivamente. As variáveis que representam a altura e largura do elemento irradiante são, respectivamente, $H_{ele.irr}$ e $W_{ele.irr}$.

Tabela 5.1: Parâmetros geométricos para projetos de antenas *patch* cardioide.

Antena cardioide	A (mm)	$L_{fenda.nef}$ (mm)	$2\pi/\theta_f$ (rad)	L_{qwt} (mm)	W_{qwt} (mm)	w_f (mm)	$H_{ele.irr}$ (mm)	$W_{ele.irr}$ (mm)
Projeto 1	10,233	0,000	0,000	10,775	0,900	0,6	23,00	26,56
Projeto 2	10,012	23,550	2,756	11,525	0,430	0,6	22,52	26,01
Projeto 3	16,260	0,000	0,000	17,000	1,225	0,6	36,58	42,24
Projeto 4	15,835	26,384	2,244	15,050	0,900	0,6	35,63	41,11

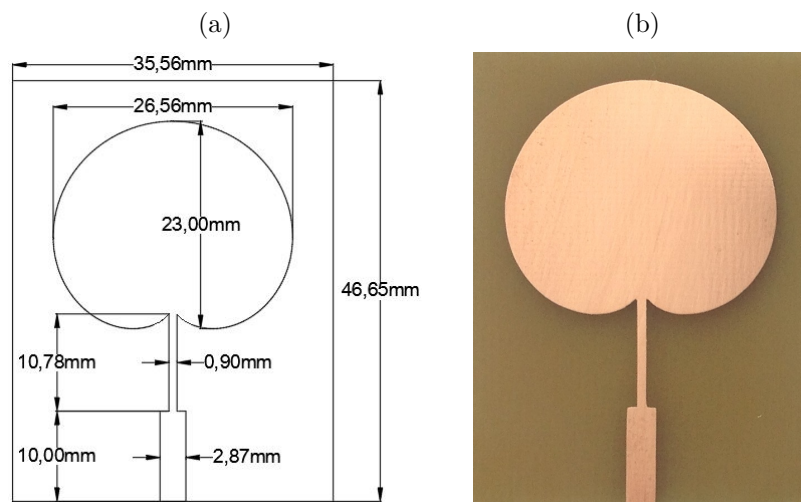
5.1.2 Projeto 1: Antena *Patch* Cardioide sem Fenda para 3,468 GHz e 5,411 GHz

O objetivo Projeto 1 era de obter a frequência de ressonância na banda de 5 GHz e usar a fenda para sintonizar a WMAN 3,5 GHz. Entretanto, essa antena apresenta as duas frequências nas bandas de interesse sem a necessidade de aplicação da fenda catacáustica.

Como apresentado na Tabela 5.1, o Projeto 1 tem o raio circunferência base igual a 10,233 mm e o transformador de quarto de onda tem 10,775 mm de comprimento e 0,9 mm de largura. O elemento irradiante tem 23 mm de comprimento por 26,56 mm de largura.

A Figura 5.1(a) ilustra o leiaute desenhado para a antena *patch* sem fenda projetada para as bandas de 3,5 GHz e 5 GHz, em que a antena tem 46,65 mm de comprimento e 35,56 mm de largura. Enquanto que a Figura 5.1(b) apresenta a antena fabricada.

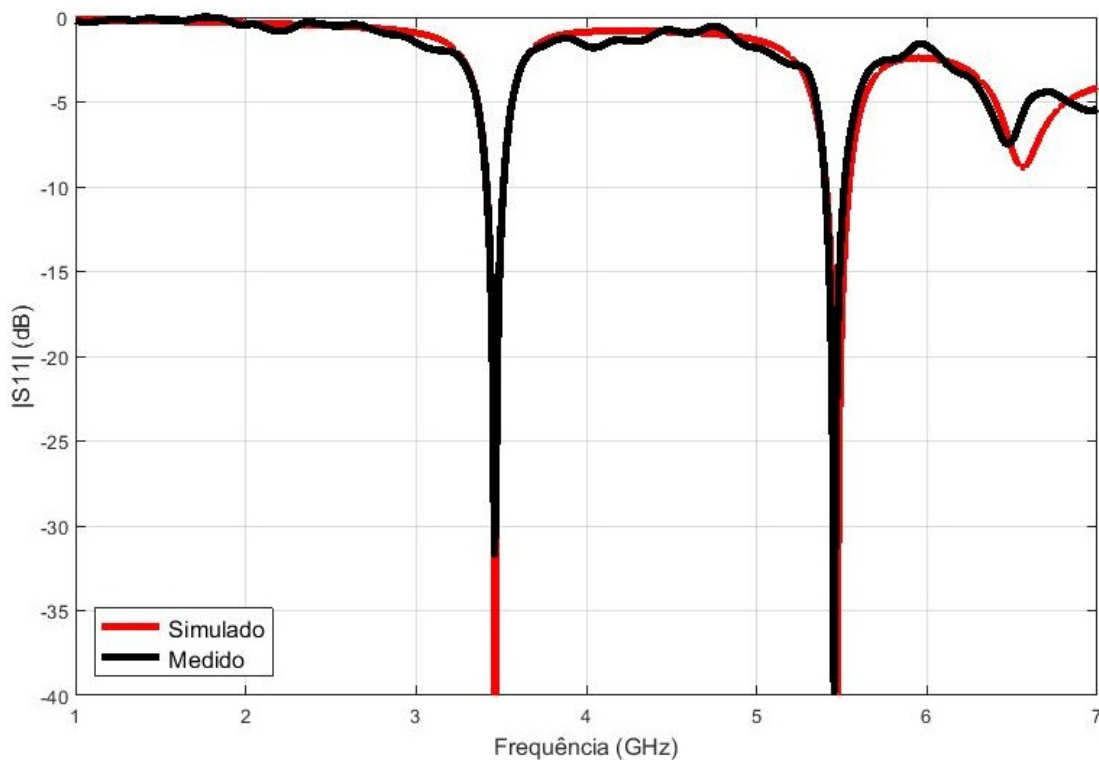
Figura 5.1: Antena *patch* cardioide sem fenda projetada para 3,5 GHz e 5 GHz do Projeto 1: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.2 ilustra a comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide sem fenda projetada para as bandas de frequências de WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz do Projeto 1. É possível verificar que as frequências de ressonância e as bandas de frequências são similares para os resultados medido e simulado. Os módulos de coeficientes de reflexão medidos para as frequências de ressonância estão abaixo de -30 dB, indicando que os casamentos de impedâncias para as duas bandas estão em concordância com os resultados simulados.

Figura 5.2: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide sem fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 GHz e 5 GHz do Projeto 1.

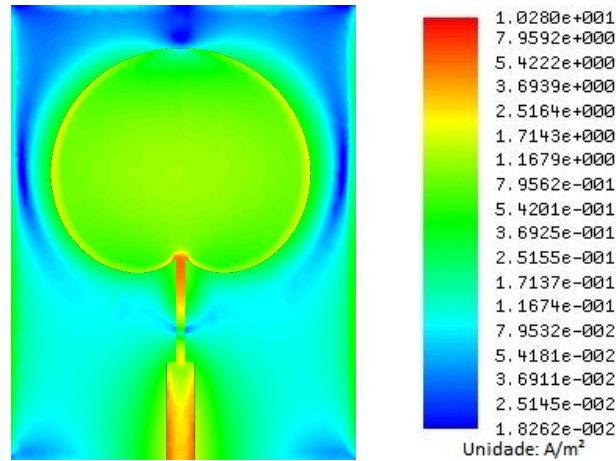


Fonte: Autoria própria, 2020.

A medição em laboratório constata que a banda para WMAN tem a frequência inferior de 3,415 GHz e a superior de 3,513 GHz, resultando em uma largura de banda de 98 MHz. A frequência de ressonância é de 3,460 GHz. E para a banda de WLAN 5 GHz, a frequência inferior é 5,410 GHz e superior é 5,508 GHz, desse modo, e apresentando uma largura de 98 MHz. A ressonância ocorre em 5,455 GHz.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 1 simulada para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz é apresentada na Figura 5.3. A distribuição é bem uniforme no elemento irradiante com redução de intensidade na parte superior e aumento em direção às laterais.

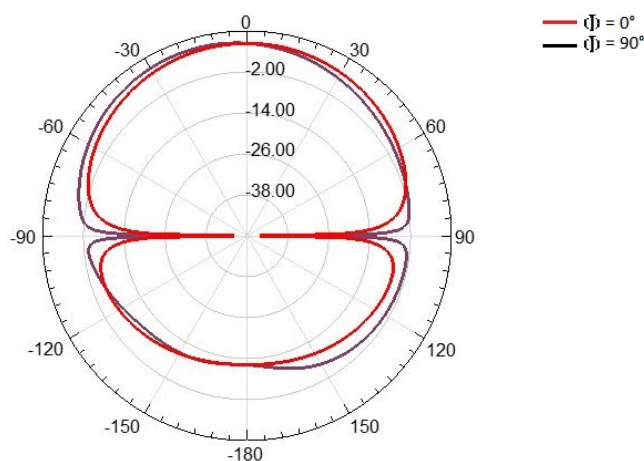
Figura 5.3: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz do Projeto 1.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Devido à distribuição de densidade de corrente, é gerado um diagrama de irradiação mais uniforme. A Figura 5.4 apresenta o diagrama de irradiação 2D do Projeto 1 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz. O lóbulo se projeta para a frente e para as costas da antena. Além de que não apresenta tendência de formação de lóbulos secundários.

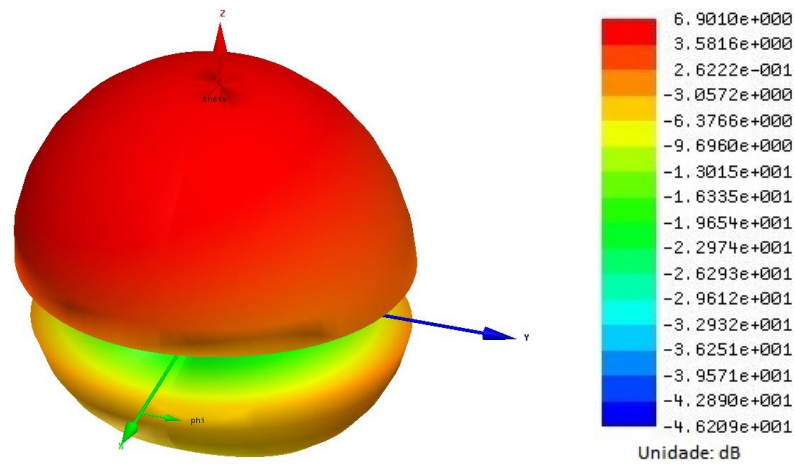
Figura 5.4: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz do Projeto 1.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 1 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz é ilustrado Figura 5.5. Em que é melhor visível os lóbulos, os quais apresenta ganho máximo de 6,90 dB apontando para a frente da antena.

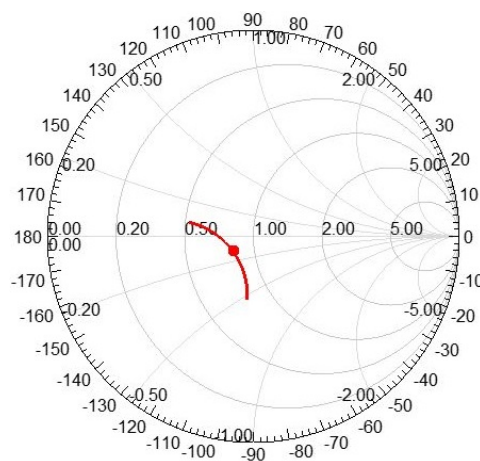
Figura 5.5: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,468 GHz do Projeto 1.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.6 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 1 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda, cuja a frequência de 3,468 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8126 - j0,0531$.

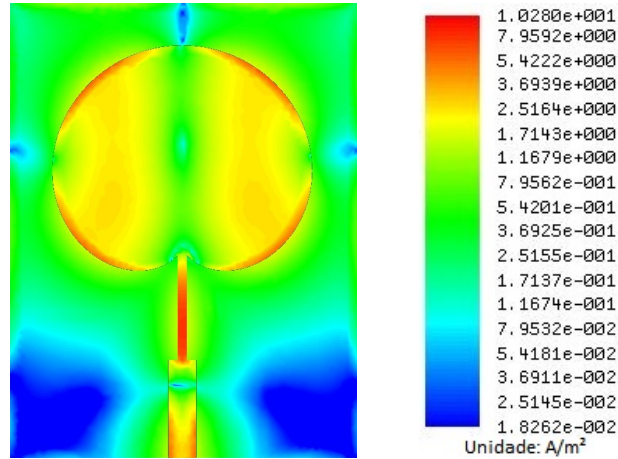
Figura 5.6: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 1 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda, cuja a frequência de 3,468 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8126 - j0,0531$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para a banda de 5 GHz, a distribuição de densidade de corrente do Projeto 1 simulada para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 5,411 GHz é ilustrada na Figura 5.7. Maiores valores de densidade de corrente estão concentrados nas laterais do elemento irradiante. Os menores valores de densidade de corrente no elemento irradiante estão presentes no meio do elemento irradiante e na união com transformador de quarto de onda.

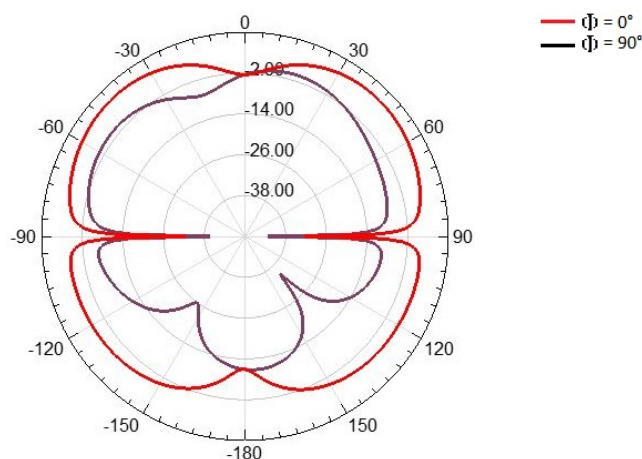
Figura 5.7: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 5,411 GHz do Projeto 1.



Fonte: Autorial própria, 2020.

A Figura 5.8 apresenta o diagrama de irradiação 2D do Projeto 1 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 5,411 GHz. O diagrama de irradiação apresentou dois lóbulos principais bem destacados. O lóbulo posterior é bastante deformado devido a distribuição de densidade de corrente.

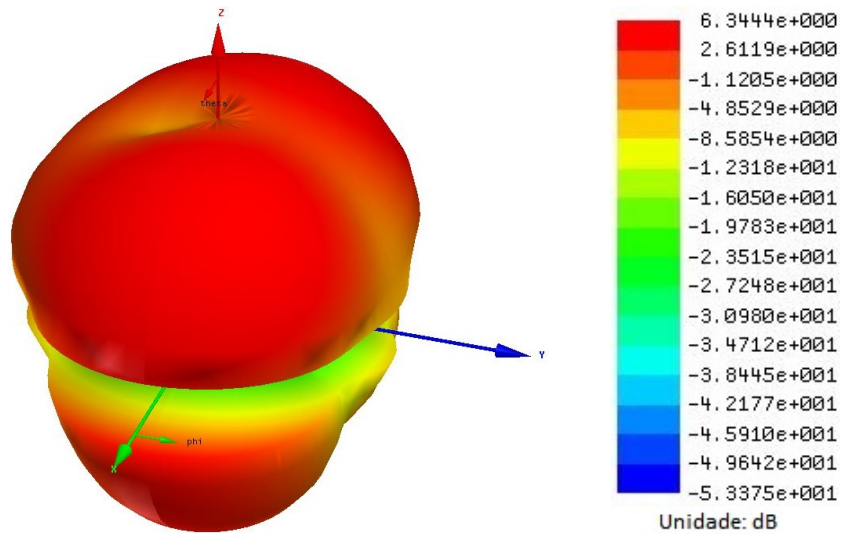
Figura 5.8: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* cardioide sem fenda para a banda de WLAN 5 GHz do Projeto 1.



Fonte: Autorial própria, 2020.

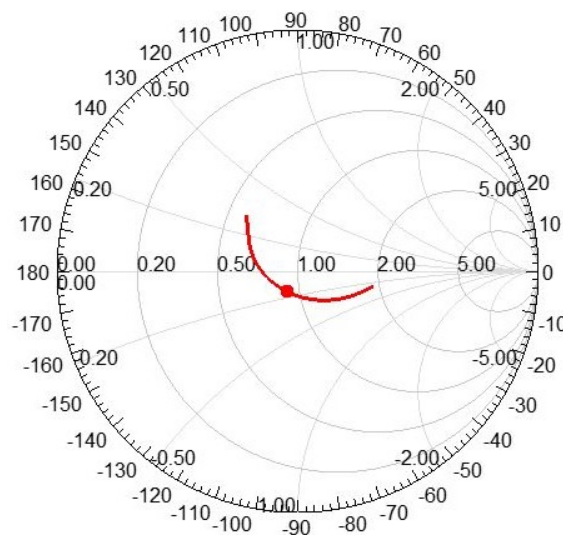
Enquanto que na Figura 5.9, é ilustrado o diagrama de irradiação 3D do Projeto 1 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 5,411 GHz. O ganho máximo é de 6,34 dB. A irradiação é para as laterais do elemento da antena. O lóbulo frontal tem a tendência de se dividir em dois lóbulos apontando para as laterais da antena.

Figura 5.9: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 5,411 GHz do Projeto 1.



A Figura 5.10 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 1 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda, cuja a frequência de 5,411 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8750 - j0,1608$.

Figura 5.10: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 1 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda, cuja a frequência de 5,411 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8750 - j0,1608$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

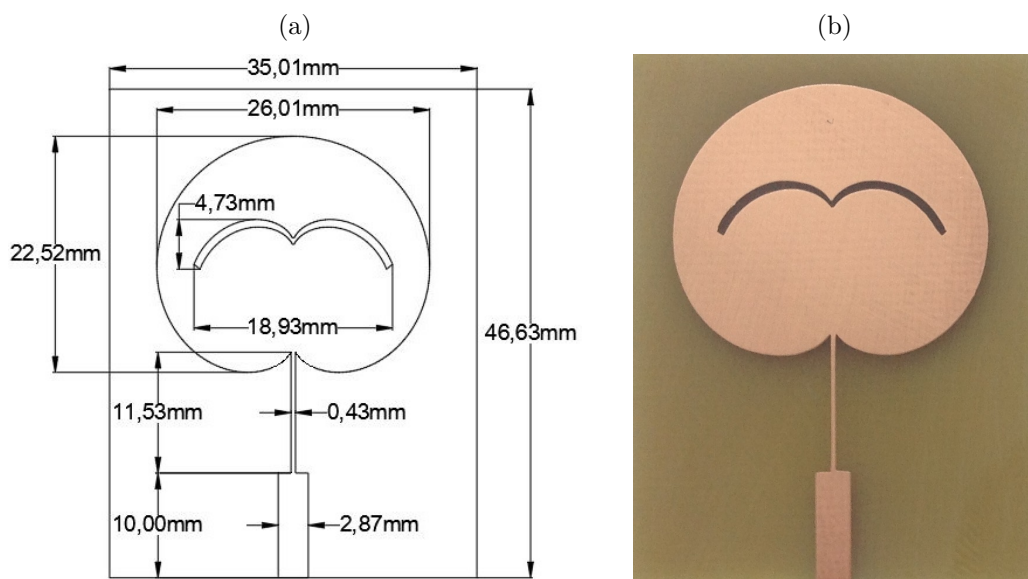
5.1.3 Projeto 2: Antena *Patch* Cardioide com Fenda para 2,444 GHz e 5,402 GHz

Com a introdução da fenda é possível a sintonia na banda de WLAN 2,4 GHz, mantendo constante a resposta na banda de WLAN 5 GHz. Sendo que, para a viabilização do projeto, o transformador de quarto de onda é adaptado para atender o casamento de impedância devido à limitação de fabricação da antena.

Segundo a Tabela 5.1, a circunferência base do elemento irradiante tem 10,012 mm de raio e apresenta uma fenda com ângulo $2\pi/\theta_f$ igual a 2,756 radianos, gerando uma fenda com o comprimento de 23,55 mm. O elemento irradiante tem 22,52 mm de comprimento e 26,01 mm de largura. Enquanto que o transformador tem as medidas de 11,525 mm de comprimento e 0,430 mm de largura.

A Figura 5.11(a) apresenta o leiaute desenhado para a antena *patch* cardioide com fenda projetada para as bandas de 2,4 GHz e 5 GHz, em que a comprimento é de 46,65 mm e a largura é de 35,56 mm. Enquanto que a Figura 5.11(b) ilustra a antena do Projeto 2 fabricada e medida em laboratório.

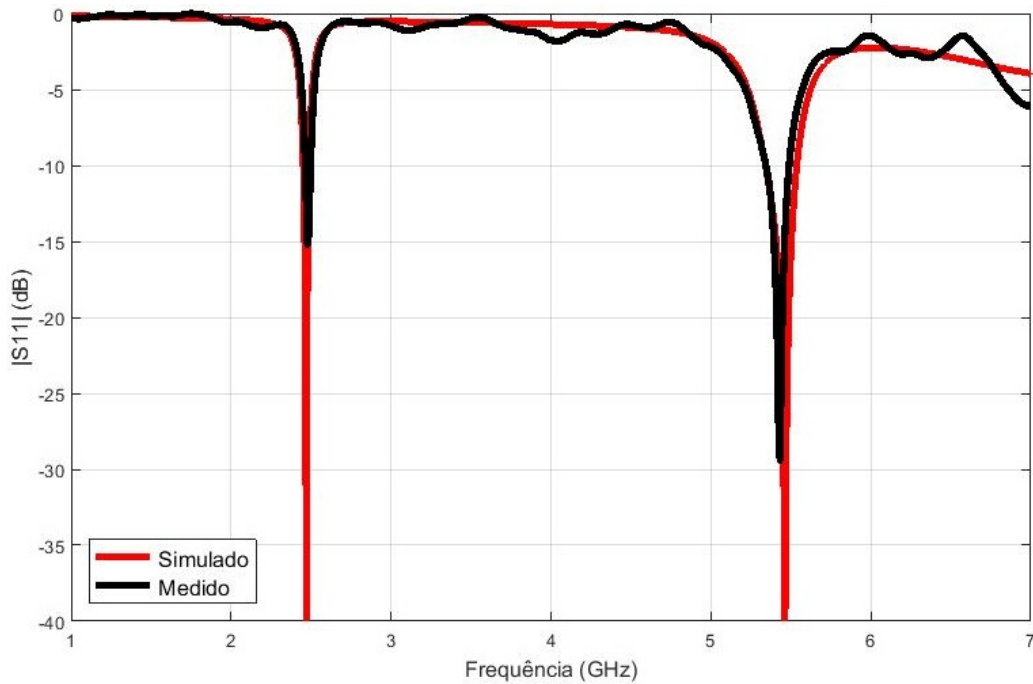
Figura 5.11: Antena *patch* cardioide com fenda projetada para as bandas de 2,4 GHz e 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.12 apresenta os resultados comparativos entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide com fenda projetada para as bandas de frequências de 2,4 GHz e 5 GHz. Para a superior, há presença de um deslocamento da frequência de ressonância. E para a banda inferior, o resultado medido está de acordo com o simulado.

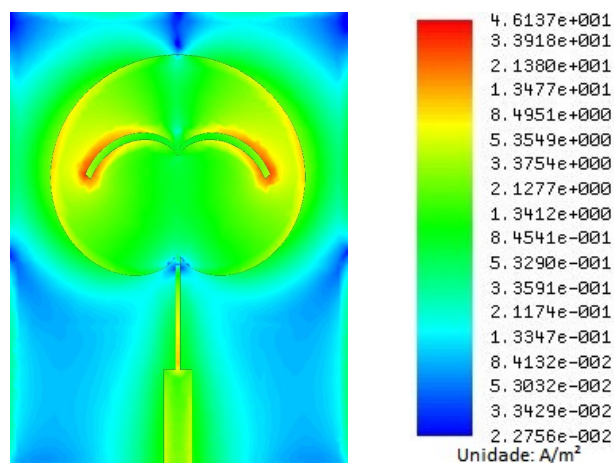
Figura 5.12: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide com fenda projetada para as bandas de frequências de 2,4 GHz e 5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para o resultado medido, a largura de banda de frequências para WLAN 2,4 GHz é de 23 MHz. Apresentando a frequência inferior de 2,470 GHz e a superior de 2,493 GHz, com ressonância em 2,478 GHz. E para a banda de 5 GHz, a frequência inferior é de 5,350 GHz e a superior de 5,485 GHz, apresentando uma largura de banda igual a 135 MHz, com a frequência de ressonância em 5,433 GHz.

Figura 5.13: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz do Projeto 2.

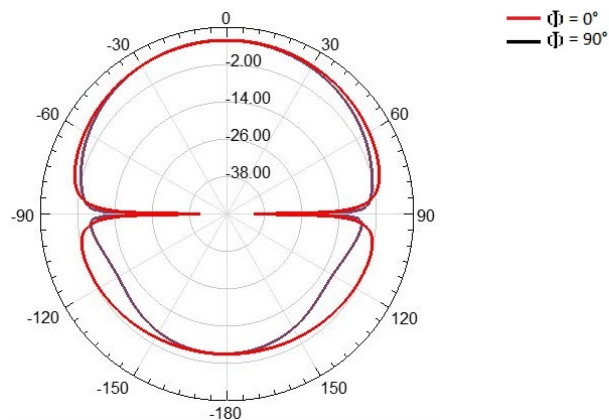


Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.13 apresenta a distribuição de densidade de corrente do Projeto 2 simulada para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz. A densidade de corrente tem maior concentração nas bordas da fenda, enquanto que a ligação entre o transformador de quarto de onda com o elemento irradiante apresenta a menor densidade de corrente.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 2 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz é apresentado na Figura 5.14, em que é perceptível um resultado mais uniforme e apresentando dois lóbulos, um frontal e outro posterior.

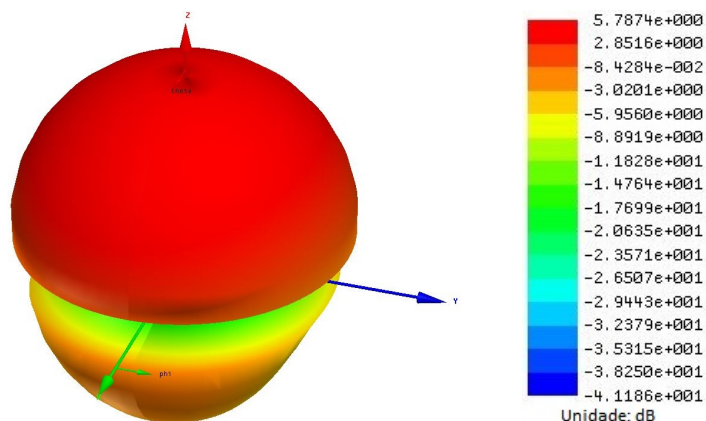
Figura 5.14: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz do Projeto 2.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.15, ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 2 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz. É possível observar um lóbulo que se projeta para a frente da antena e o lóbulo posterior. Não há tendência de formação de lóbulos secundários. O ganho máximo é de 5,79 dB.

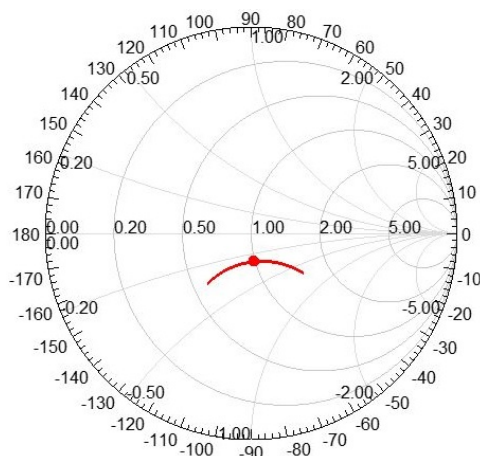
Figura 5.15: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 2,444 GHz do Projeto 2.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.16 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 2 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda, cuja a frequência de 2,444 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 1,0103 - j0,2832$.

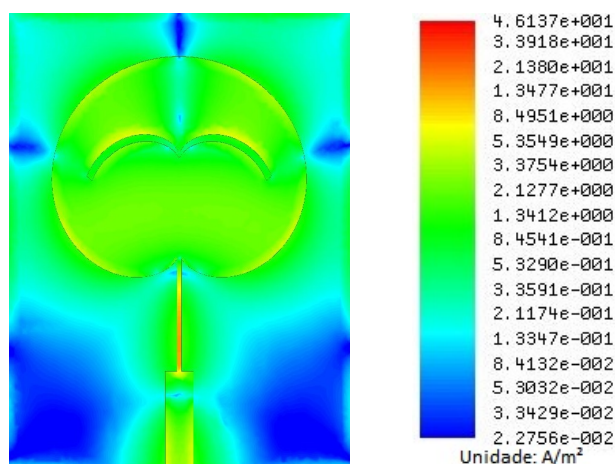
Figura 5.16: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 2 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda cuja a frequência de 2,444 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 1,0103 - j0,2832$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para a banda WLAN de 5 GHz, a distribuição de densidade de corrente do Projeto 2 simulada para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz é apresentada na Figura 5.17. É possível observar que a densidade de corrente no elemento irradiante está mais concentrada na parte superior da fenda e nas bordas das laterais. O ganho máximo de irradiação é de 4,62 dB.

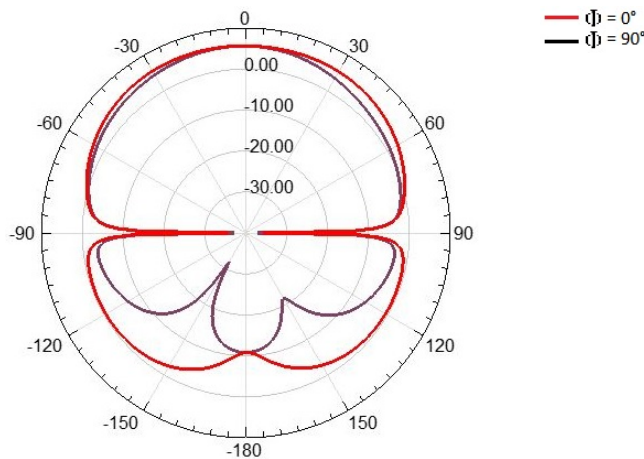
Figura 5.17: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz do Projeto 2.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 2 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz é ilustrado na Figura 5.18, apresentando apenas um lóbulo frontal bem definido e lóbulos posteriores deformados.

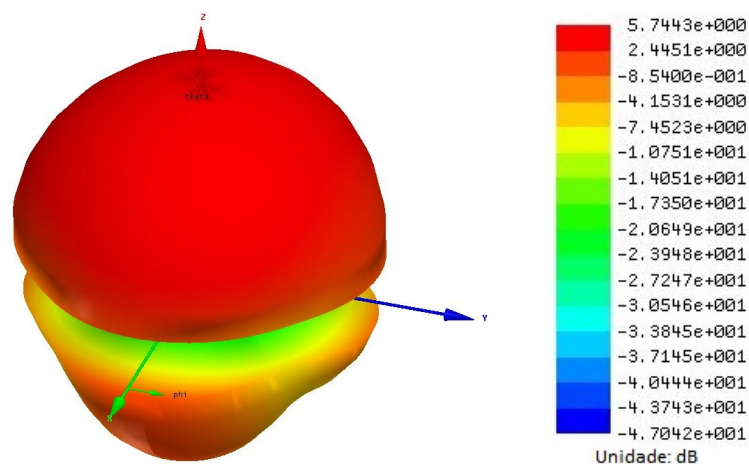
Figura 5.18: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz do Projeto 2.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.9, apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 2 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz. O ganho máximo apresentado é de 5,74 dB. No diagrama de irradiação 3D também é mostrado o lóbulo principal bem definido. E o posterior com tendência de se dividir em 4, dois deles propagando em direção às laterais da antena, um para a parte superior e ou outro para a parte inferior da antena.

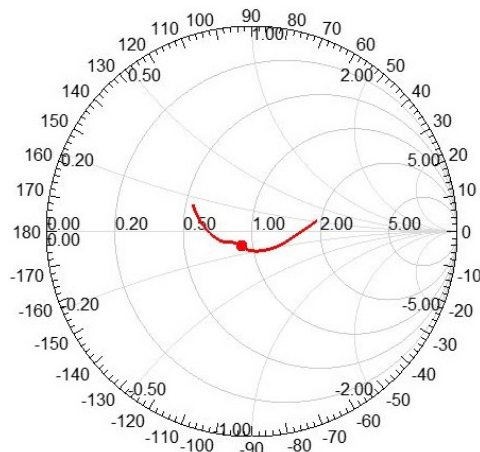
Figura 5.19: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 5,402 GHz do Projeto 2.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.20 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 2 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda, cuja a frequência de 5,402 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,8775 - j0,0849$.

Figura 5.20: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 2 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda, cuja a frequência de 5,402 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,8775 - j0,0849$.

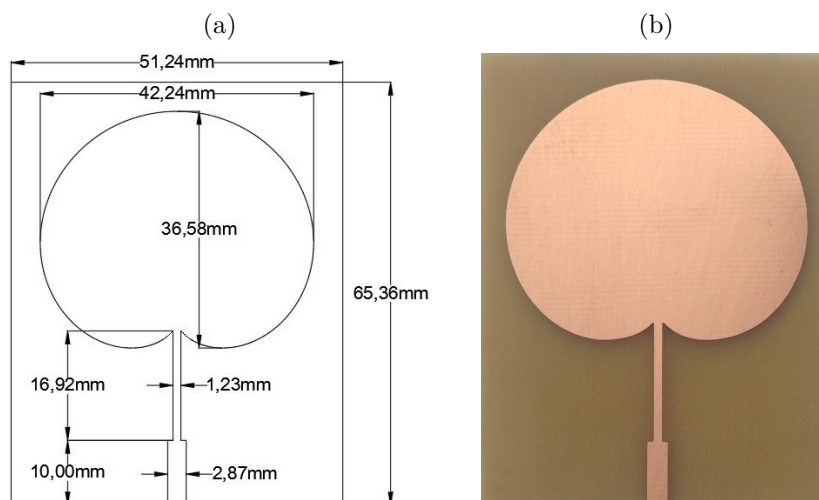


Fonte: Autoria própria, 2020.

5.1.4 Projeto 3: Antena *Patch* Cardioide sem Fenda para 2,185 GHz e 3,461 GHz

A antena *patch* cardioide sem fenda do Projeto 3 tem o objetivo de sintonizar a banda de 3,5 GHz. A Figura 5.21(a) ilustra o leiaute desenhado para a antena *patch* cardioide sem fenda projetada para 3,5 GHz. Enquanto que 5.21(b) apresenta a antena fabricada em FR4.

Figura 5.21: Antena *patch* cardioide sem fenda projetada para 3,5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



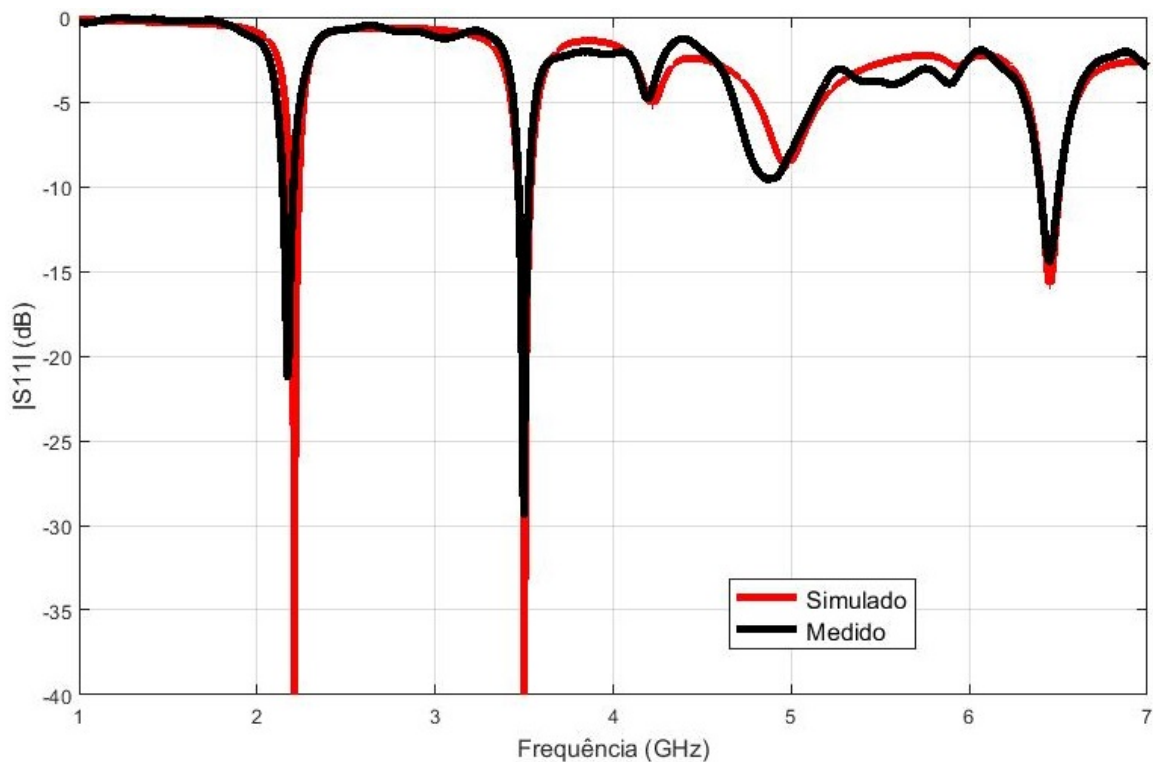
Fonte: Autoria própria, 2020.

Três bandas de frequências são obtidas com a medição em laboratório. A primeira banda apresenta uma largura de banda de 52 MHz com a frequência inferior de 2,148 GHz e a superior é igual a 2,200 GHz. Sendo que a frequência de ressonância é 2,170 GHz. A segunda banda é a WMAN 3,5 GHz, com a frequência de ressonância em 3,498 GHz. A banda tem a frequência inferior de 3,475 GHz e a superior de 3,520 GHz, obtendo uma largura de 45 MHz.

Também é possível melhorar a sintonia na banda em 6 GHz, com ressonância em 6,453 GHz e largura de banda de 105 MHz, de 6,400 a 6,505 GHz. No entanto, a análise dessa banda não entra no estudo dessa dissertação.

O gráfico da Figura 5.22 apresenta a comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide sem fenda projetada para as banda de frequência de 3,5 GHz.

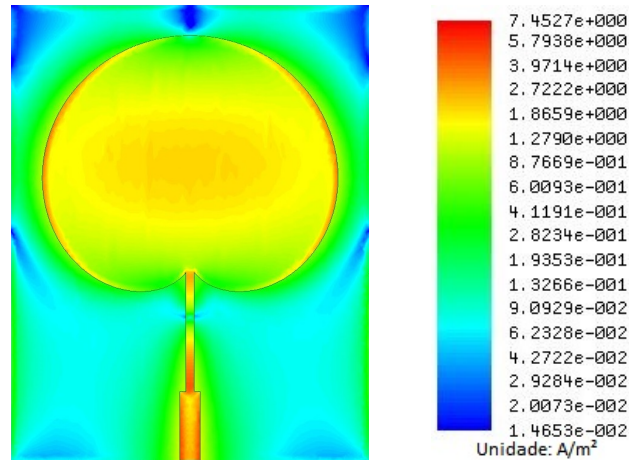
Figura 5.22: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide sem fenda projetada para as banda de frequência de 3,5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.23 apresenta a distribuição de densidade de corrente do Projeto 3 simulada para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz. Os maiores valores de densidades de correntes estão no centro e nas bordas laterais do elemento irradiante.

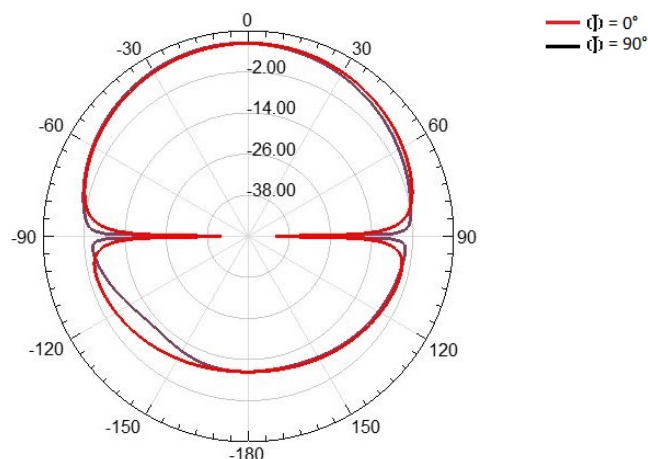
Figura 5.23: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz do Projeto 3.



Fonte: Aatoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 3 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz é ilustrado na Figura 5.24. A antena apresenta dois lóbulos, o maior apontando para a frente da antena.

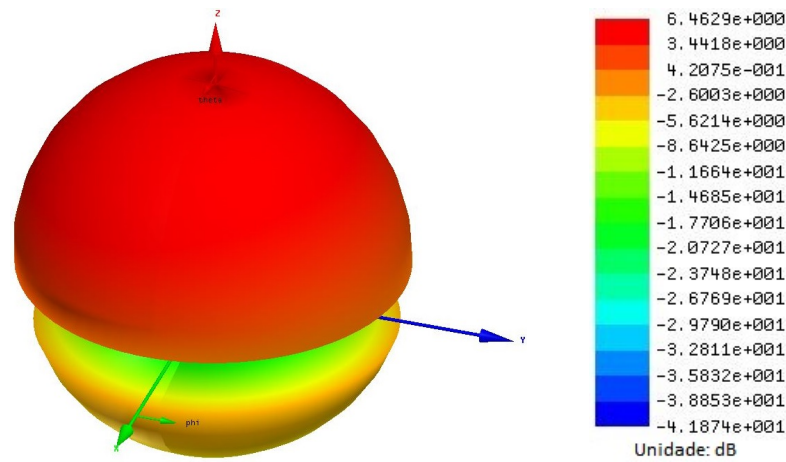
Figura 5.24: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz do Projeto 3.



Fonte: Aatoria própria, 2020.

A Figura 5.25 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 3 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz. A presença dos lóbulos projetados para a frente e para as costas da antena é melhor visualizado. O ganho máximo é igual a 6,46 dB.

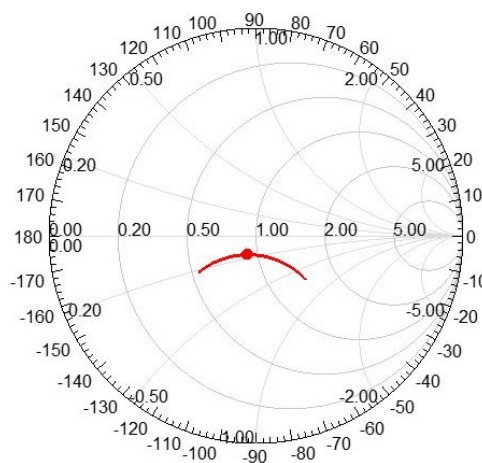
Figura 5.25: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 2,185 GHz do Projeto 3.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.26 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 3 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda, cuja a frequência de 2,185 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8921 - j0,1647$.

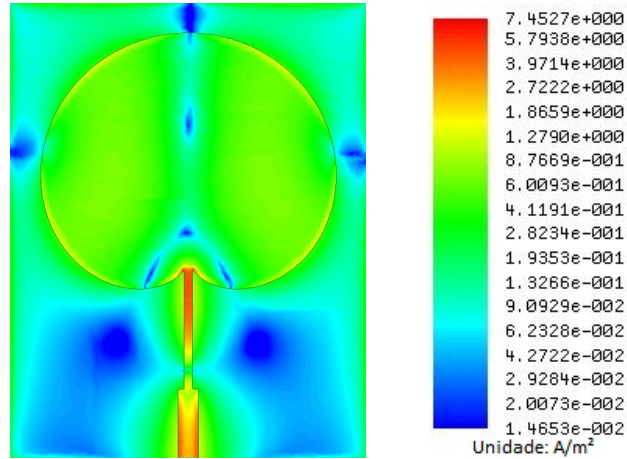
Figura 5.26: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 3 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda, cuja a frequência de 2,185 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8921 - j0,1647$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para a banda de 3,5 GHz, a distribuição de densidade de corrente do Projeto 3 simulada para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz é ilustrada na Figura 5.27. De acordo com o resultado obtido, verifica-se uma maior densidade de corrente no elemento irradiante nas bordas laterais.

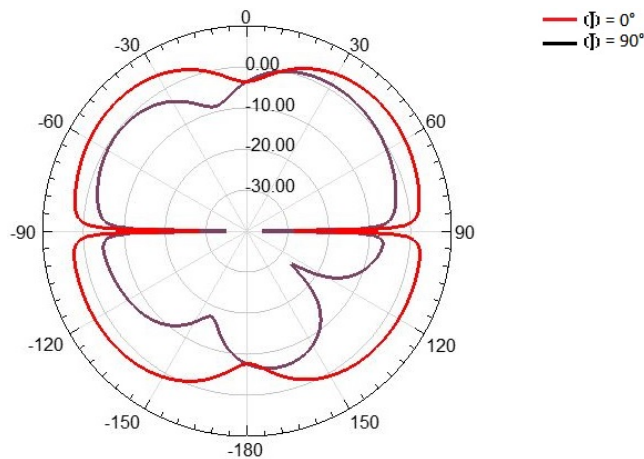
Figura 5.27: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz do Projeto 3.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A antena apresenta um lóbulo frontal irregular e dois posteriores. A irradiação tem maiores valores de intensidades de irradiação para as laterais da antena. A Figura 5.28 ilustra a diagrama de irradiação 2D do Projeto 3 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz.

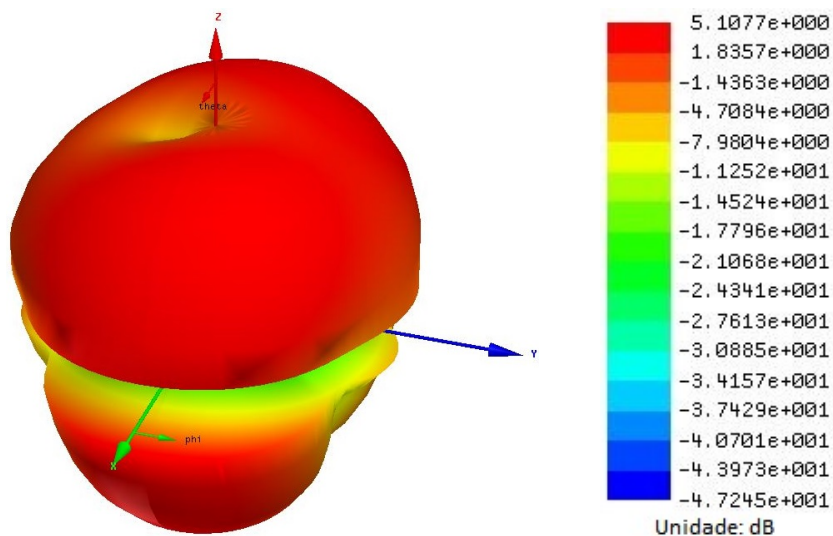
Figura 5.28: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz do Projeto 3.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.9 ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 3 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz. Os lóbulos irradiam principalmente para as laterais da antena com ganho máximo é de 5,11 dB. O centro do lóbulo frontal têm os menores valores de intensidade de irradiação, considerando a propagação para a frente da antena.

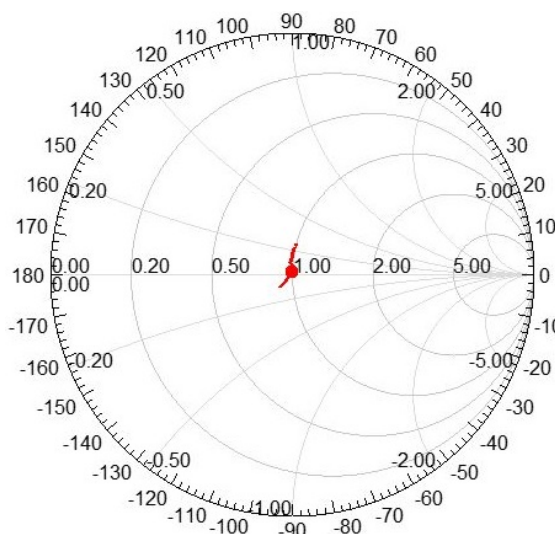
Figura 5.29: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* cardioide sem fenda na frequência de 3,461 GHz do Projeto 3.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.30 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 3 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda, cuja a frequência de 3,461 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 1,0263 - j0,0461$.

Figura 5.30: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 3 simulado para a antena *patch* cardioide sem fenda, cuja a frequência de 3,461 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 1,0263 - j0,0461$.



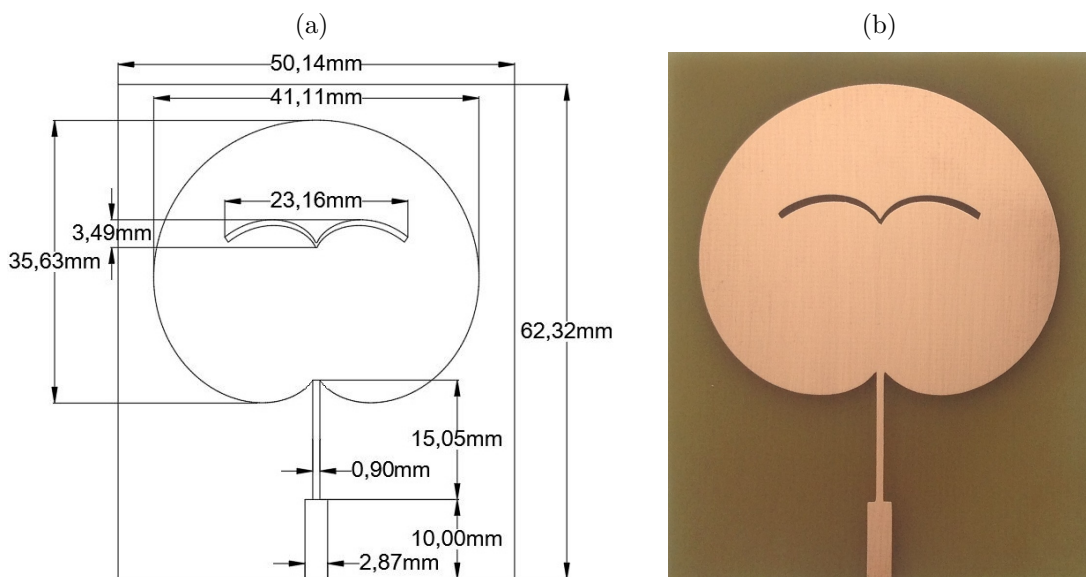
Fonte: Autoria própria, 2020.

5.1.5 Projeto 4: Antena *Patch* Cardioide com Fenda para 1,822 GHz e 3,493 GHz

Tomando como base os dados para a antena *patch* cardioide sem fenda do Projeto 3, é aplicado a fenda catacústica de comprimento $L_{fenda.nef}$ com ângulo de abertura igual a 2,244 radianos. Além disso, o raio da circunferência base, A , é reduzido para 15,835 mm. Desse modo, o elemento irradiante tem 35,63 mm de comprimento por 41,11 mm de largura e a antena tem 50,14 mm de largura por 62,32 mm de comprimento. Por fim, o transformado de quarto de onda apresenta 0,9 mm de largura por 15,05 mm de comprimento.

A Figura 5.31(a) apresenta o leiaute desenhado para a antena *patch* cardioide com fenda projetada para as bandas de telefonia móvel 1800 MHz e para WMAN 3,5 GHz. Enquanto que a Figura 5.31(b) ilustra a antena fabricada, a qual foi submetida às medições em laboratório.

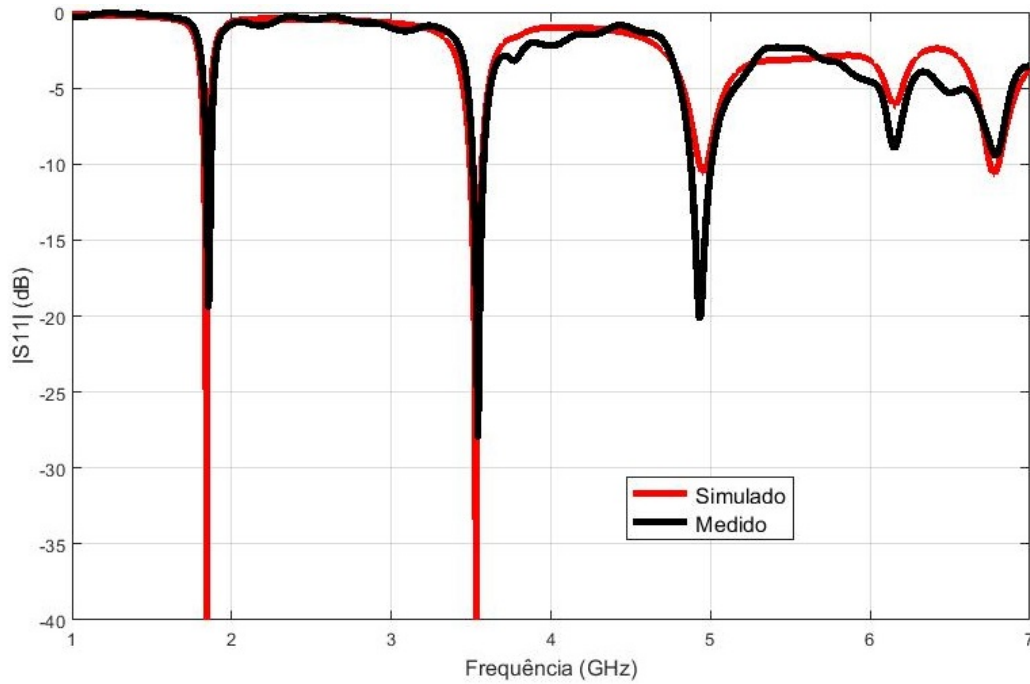
Figura 5.31: Antena *patch* cardioide com fenda projetada para 1800 MHz e 3,5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.32 apresenta o gráfico comparativo entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide com fenda projetada para as bandas de frequências de 1800 MHz e 3,5 GHz. Nele é possível observar a presença de uma terceira banda, que está fora dos estudos dessa dissertação, mas indicando que a antena pode apresentar mais bandas de operação.

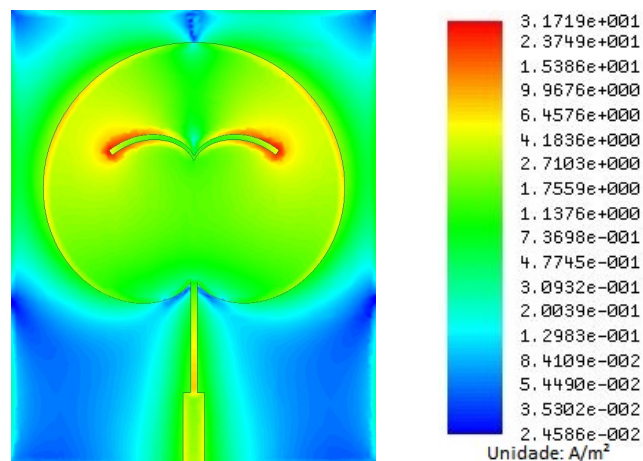
Figura 5.32: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide com fenda projetada para as bandas de frequências de 1800 MHz e 3,5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para as medições em laboratório, a primeira banda é a de telefonia móvel e apresenta a ressonância em 1,855 GHz e uma largura de banda igual a 22 MHz, com a frequência inferior de 1,848 GHz e a superior de 1,870 GHz. Enquanto que a a segunda banda apresenta a frequência de ressonância em 3,543 GHz e uma largura de banda igual a 60 MHz, variando de 3,513 a 3,573 GHz.

Figura 5.33: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz do Projeto 4.

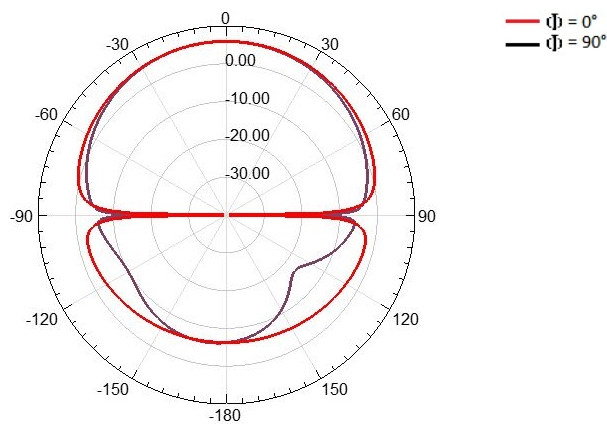


Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 4 simulada para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz é apresentada na Figura 5.33. É possível observar que os maiores valores de densidade de corrente está presente na borda da fenda catacáustica e nas laterais no elemento irradiante.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 4 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz é apresentado na Figura 5.34. A antena apresenta apenas um lóbulo frontal bem definido e um nas costas da antena.

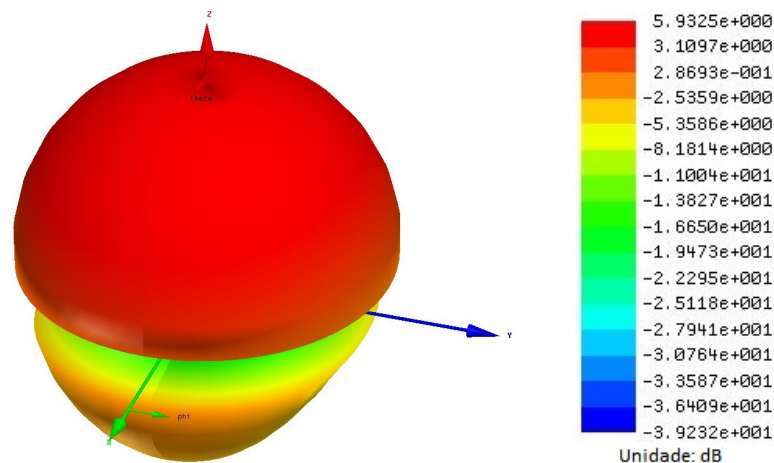
Figura 5.34: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2 para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz do Projeto 4.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.35 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 4 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz. O ganho máximo é de 5,93 dB.

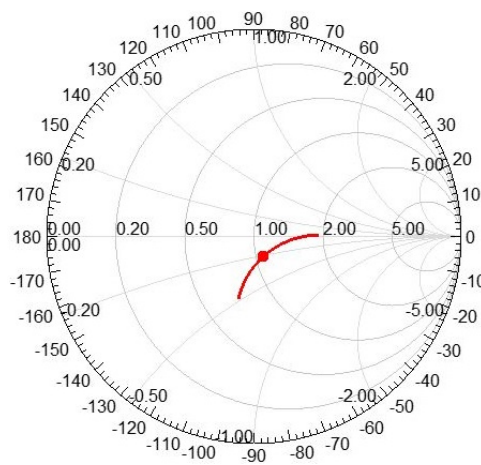
Figura 5.35: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D do Projeto 4 para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 1,822 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.36 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 4 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda, cuja a frequência de 1,822 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0628 - j0,2331$.

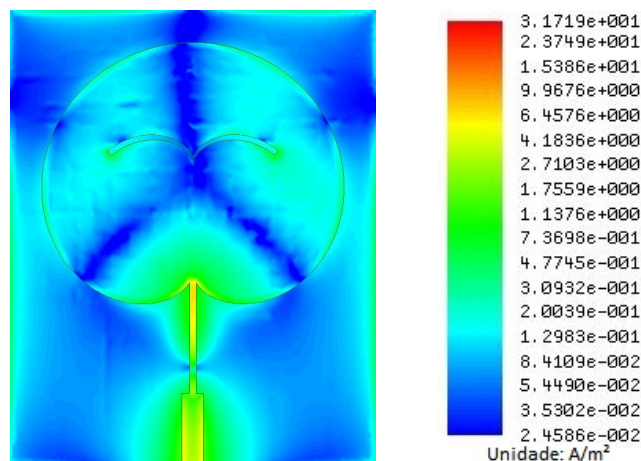
Figura 5.36: Gpresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 4 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda, cuja a frequência de 1,822 GHz apresenta impedância normalizada, $Z = 1,0628 - j0,2331$, para 50Ω .



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 4 simulada para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz é ilustrada pela Figura 5.37. A maior parte da densidade de corrente no elemento irradiante está concentrada próximo a fenda e na parte inferior. A simetria bilateral é mantida.

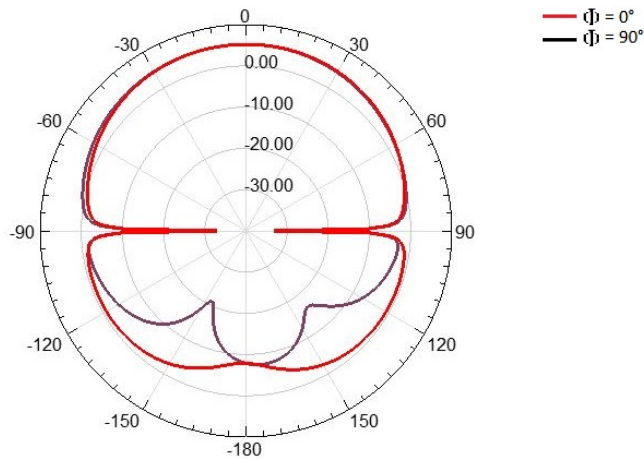
Figura 5.37: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz do Projeto 4.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.38 apresenta o diagrama de irradiação 2D do Projeto 4 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz. É visível a antena para essa banda apresentar um lóbulo frontal bem definido e três lóbulos irregulares nas costas da antena.

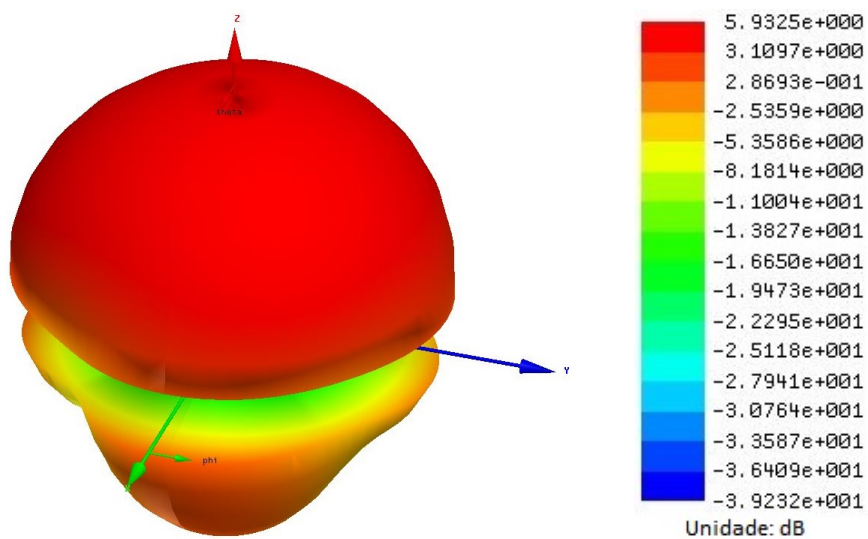
Figura 5.38: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz do Projeto 4.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 4 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz é apresentado na Figura 5.39. O maior valor de ganho é de 5,93 dB apontando para a frente da antena.

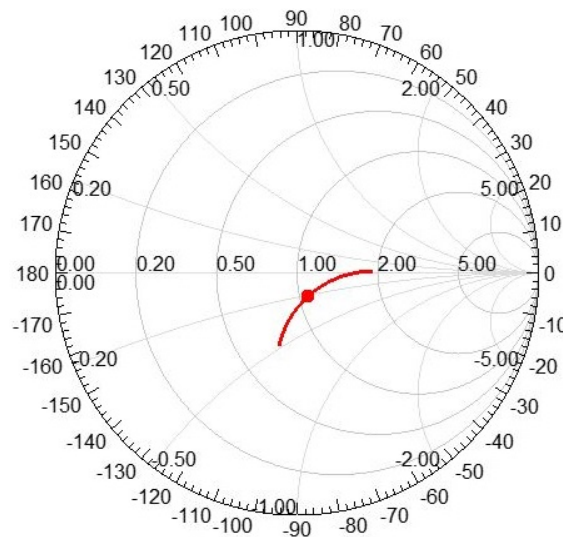
Figura 5.39: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz do Projeto 4.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.40 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 4 simulado para a antena *patch* cardioide com fenda, cuja a frequência de 3,493 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9887 - j0,0088$.

Figura 5.40: Carta de Smith do Projeto 4 simulada pelo ANSYS Designer® para a antena *patch* cardioide com fenda na frequência de 3,493 GHz e impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9887 - j0,0088$.



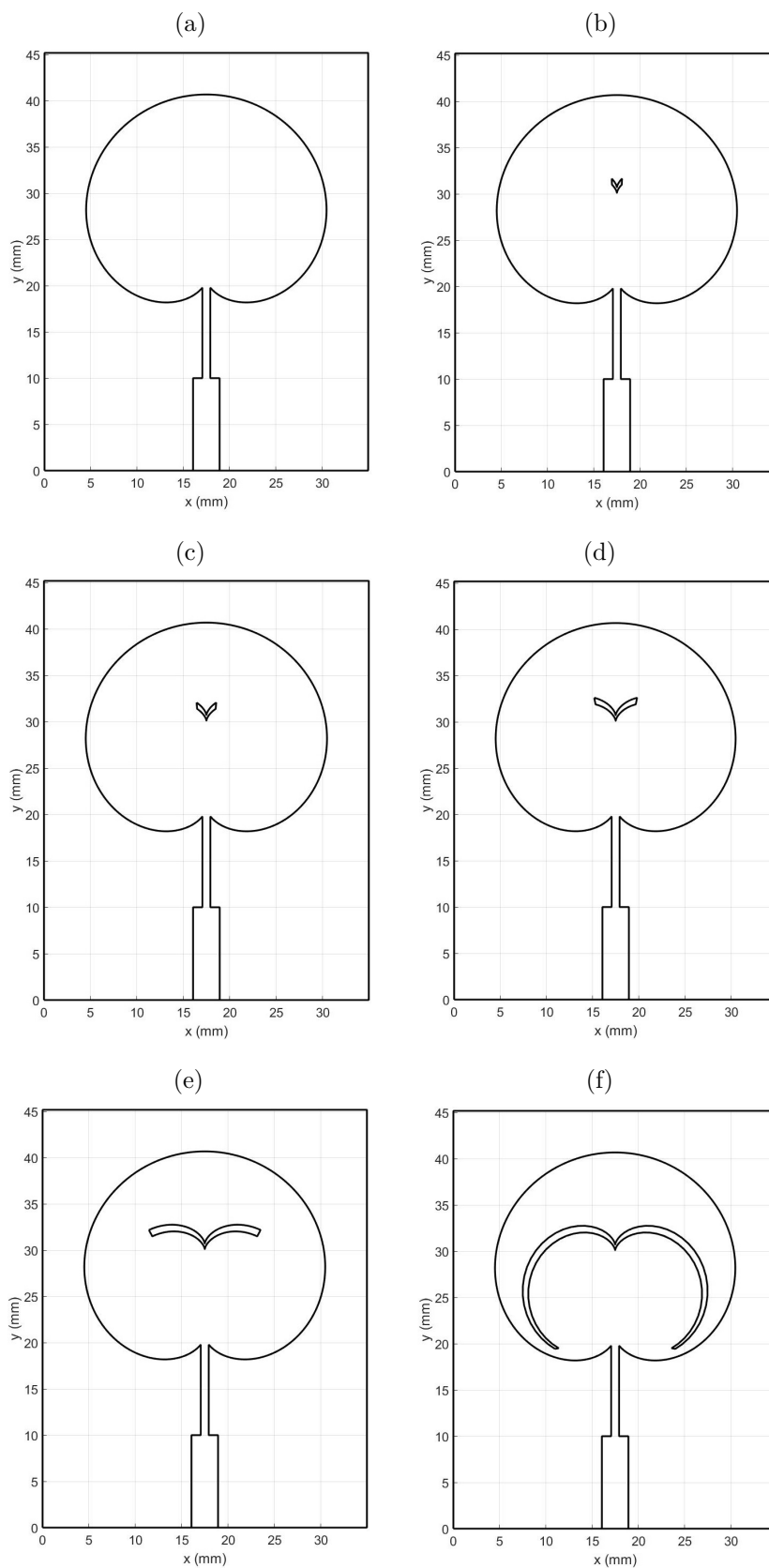
Fonte: Autoria própria, 2020.

5.1.6 Análise Paramétrica de Antenas *Patch* Cardioide com Fendas Catacáusticas

As antenas foram simuladas utilizando o ANSYS Designer®. Os parâmetros usados para a análise paramétrica da antena *patch* cardioide foram $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,86$ mm, $L_{qwt} = 9,8$ mm e $w_f = 0,6$ mm. Sendo realizada a análise de valores de $2\pi/\theta_f$ variando de 0,79 até 1,50 radianos ($8,0 \geq \theta_f \geq 1,5$), em que a fenda é tão pequena que o resultado é aproximadamente o da antena sem a presença fenda. Além disso, é considerado as frequências de referências da antena *patch* cardioide sem fenda 3,507 e 5,541 GHz como referência para as análises. A resposta em banda dupla é predominante, mas isso não elimina a possibilidade de apresentar outras frequências de ressonância ou frequências interferentes.

A Figura 5.41 apresenta a comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* cardioide desenhadas com auxílio do MATLAB® para $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,86$ mm, $L_{qwt} = 9,8$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para diferentes valores de $2\pi/\theta_f$.

Figura 5.41: Comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* cardioide desenhadas com auxílio do MATLAB® para $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,86$ mm, $L_{qwt} = 9,8$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para $2\pi/\theta_f$ igual a: (a) 0,000 rad; (b) 0,785 rad; (c) 0,986 rad; (d) 1,323 rad; (e) 2,011 rad; (f) 4,189 rad.



A Tabela 5.2 apresenta as relações das frequências em porcentagem para antenas *patch* cardioide simuladas pelo ANSYS Designer®.

Tabela 5.2: Relações das frequências em porcentagem para antenas *patch* cardioide simuladas em ANSYS Designer®.

θ_f	$2\pi/\theta_f$ (rad)	$L_{fenda.nef}$ (mm)	Frequência Inferior	Frequência Superior
$+\infty$	0,0	0,000	100% 3,507 GHz	100% 5,541 GHz
8,0	0,7854	2,2151	100,00%	99,89%
5,0	1,2566	5,5576	99,26%	99,93%
4,0	1,5708	8,5232	97,43%	99,78%
3,0	2,0944	14,5500	87,68%	98,83%
2,8	2,2440	16,4740	83,75%	98,70%
2,6	2,4166	18,7810	79,07%	98,39%
2,4	2,6180	21,5684	73,71%	98,12%
2,2	2,8560	24,9586	67,61%	98,81%
2,0	3,1416	29,1000	61,19%	98,14%
1,8	3,4907	34,1532	54,61%	97,85%
1,5	4,1888	43,6500	44,91%	97,64%

Fonte: Autoria própria, 2020.

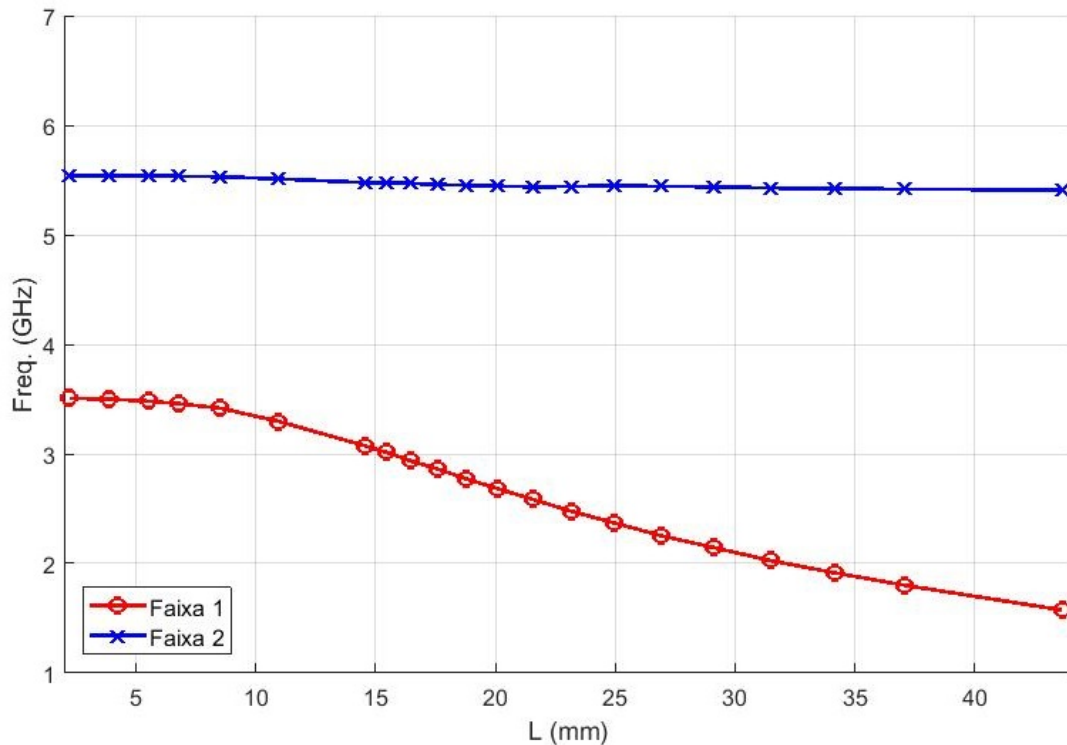
Como resultados, a frequência superior manteve-se quase fixa, tendo uma variação de 5,410 até 5,541 GHz, para valores de $2\pi/\theta_f$ variando de 0,79 até 1,50 radianos ($8,0 \geq \theta_f \geq 1,5$), como apresentado na Tabela 5.2. Sendo que quando $2\pi/\theta_f$ apresentou o valor aproximado de 0,97 radianos, a antena com fenda obteve 100% da frequência da antena sem fenda para a banda de 5 GHz.

Enquanto que as frequências inferiores tiveram maiores variações com a modificação do tamanho da fenda. Quando a fenda apresentou com tamanho ínfimo, a resposta é, aproximadamente, a da antena sem a presença da fenda. Quando a fenda se apresentou com tamanho grande, a frequência inferior é 44,91% da resposta sem a presença da fenda.

A Figura 5.42 apresenta a análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* cardioide simuladas pelo ANSYS Designer® em função dos comprimentos das fendas catacústicas (nefroide).

¹⁵ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de leiautes para comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* cardioide para $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,86$ mm, $L_{qwt} = 9,8$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Figura 5.42: Análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* cardioide simuladas pelo ANSYS Designer® em função dos comprimentos das fendas catacásticas (nefroide).



Fonte: Autoria própria, 2020.

As frequências superiores se mantêm com pouca variação. Caso seja necessário, pequenas variações no tamanho do elemento irradiante podem fazer as correções de ajustes de frequências de ressonância para a banda superior.

A faixa de frequências inferiores apresentam maiores variações. Quanto maior o tamanho da fenda, menor a frequência de ressonância da banda inferior.

5.2 Antenas *Patch* Nefroide com Fendas Catacásticas

Devido às características das nefroides apresentados na subseção 3.1.3 o tamanho do elemento irradiante de cada antena é grande quando comparado com formatos circulares e de cardioides. Além disso, apresenta duas fendas, em que cada uma apresenta uma cúspide.

Esse tipo de formato de antena apresenta múltiplas frequências de ressonância, as quais podem ser focadas ao fazer o casamento de impedância. Entretanto, apesar da vantagem de se conseguir atingir as ressonâncias nas frequências desejadas com facilidade, podem apresentar ressonâncias indesejáveis que se tornem interferentes ou até gerarem problemas. O *patch* apresenta duas fendas, em que cada uma apresenta uma cúspide. A maior desvantagem desse formato está na sensibilidade de variações de parâmetros.

Quanto mais frequências de ressonância se deseja, mais complicado é a sintonia com a fenda.

5.2.1 Parâmetros de Projetos para Antenas *Patch* Nefroide

As antenas *patch* nefroide apresentam respostas multibanda. A fenda catacústica da circunferência interna gerada pelas cúspides (nefroide) intensifica essa resposta.

O Projeto 5 apresentou ressonância em três bandas, e ao ser adicionado a fenda baseada na sua curva catacústica, Projeto 6, a resposta em banda tripla continuou. A fenda serve para controle da frequência de ressonância de algumas faixas.

O Projeto 7 e 8, de maiores tamanhos. apresentaram um aumento do número de ressonâncias. Entretanto, a presença da fenda baseada na curva catacústica para o controle da ressonâncias se tornou um fator complicante para as frequências de análise do estudo dessa dissertação.

A Tabela 5.3 apresenta os valores dos parâmetros geométricos utilizados nos Projetos 5 a 8, em que A é o raio da circunferência base para a formação dos elementos irradiantes e das fendas catacústicas; $L_{fenda.nef}$ é o comprimento das fendas; $2\pi/\theta_f$ é ângulo de formação das fendas catacústicas em radianos; L_{qwt} é o comprimento do transformador de quarto de onda; W_{qwt} é a largura do transformador de quarto de onda; w_f é diferença entre o raio da circunferência base e uma circunferência auxiliar para a formação da fenda catacústica; $H_{ele.irr}$ e $W_{ele.irr}$ são, respectivamente, comprimento e largura do elemento irradiante.

Tabela 5.3: Parâmetros geométricos para projetos de antenas *patch* nefroide.

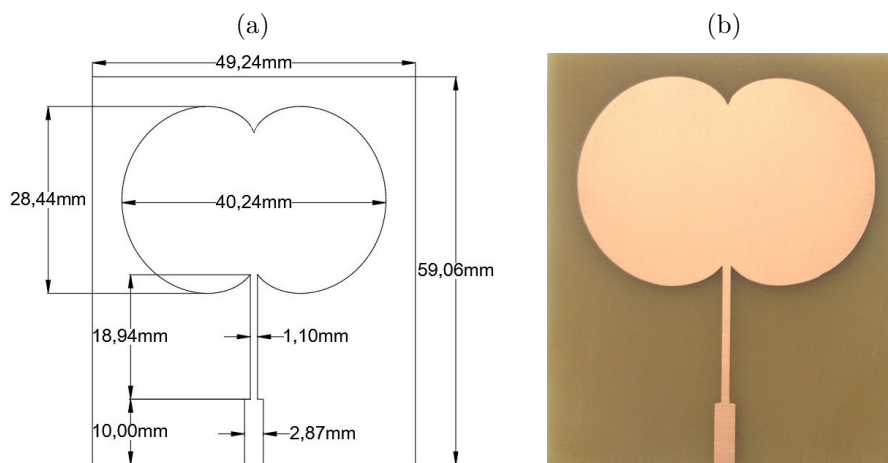
Antena nefroide	A (mm)	$L_{fenda.nef}$ (mm)	$2\pi/\theta_f$ (rad)	L_{qwt} (mm)	W_{qwt} (mm)	w_f (mm)	$H_{ele.irr}$ (mm)	$W_{ele.irr}$ (mm)
Projeto 5	5,030	0,000	0,000	19,000	1,100	0,600	28,44	40,24
Projeto 6	5,030	11,905	1,903	20,000	1,300	0,600	28,44	40,24
Projeto 7	10,000	0,000	0,000	26,400	1,050	0,600	56,56	79,99
Projeto 8	7,900	0,000	0,000	30,100	1,420	0,600	44,68	63,19

5.2.2 Projeto 5: Antena *Patch* Nefroide sem Fenda para 2,698 GHz, 3,767 GHz e 5,454 GHz

O Projeto 5 é composto pela antena *patch* nefroide sem fenda catacústica. Como resposta, obteve-se uma resposta banda tripla dentro dos limites estabelecidos em projetos. A circunferência base para a formação da nefroide tem um raio, A , de 5,03 mm. Como consequência, o elemento irradiante tem a comprimento, $H_{ele.irr}$, igual a 28,44 mm e largura, $W_{ele.irr}$, de 40,24 mm. Por fim, o transformador de quarto de onda tem o comprimento, L_{qwt} , igual a 19 mm e a largura, W_{qwt} , de 1,1 mm.

A Figura 5.43(a) ilustra o leiaute desenhado para a antena *patch* nefroide sem fenda referente ao Projeto 5. Enquanto que a Figura 5.43(b) apresenta a antena fabricada, a qual foi submetida a medição em laboratório. O tamanho da antena é de 59,06 mm de comprimento por 49,24 mm de largura, respectivamente.

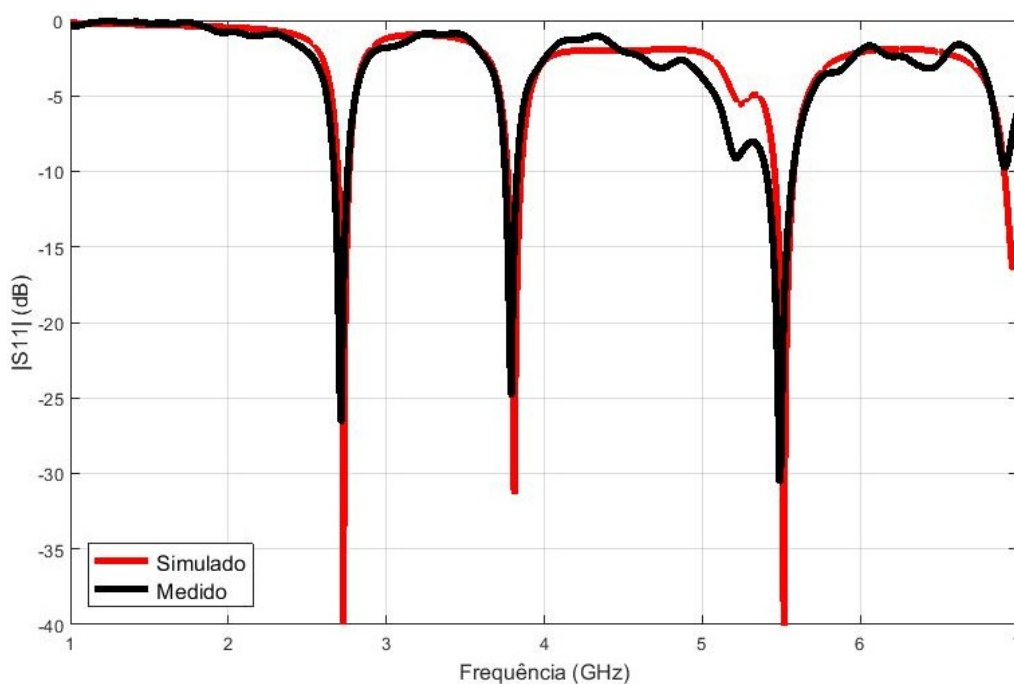
Figura 5.43: Antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.44 apresenta os resultados comparativos entre a a simulação e a medição em laboratório. Os resultados medidos foram fidedignos a simulação realizada.

Figura 5.44: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de frequências de WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

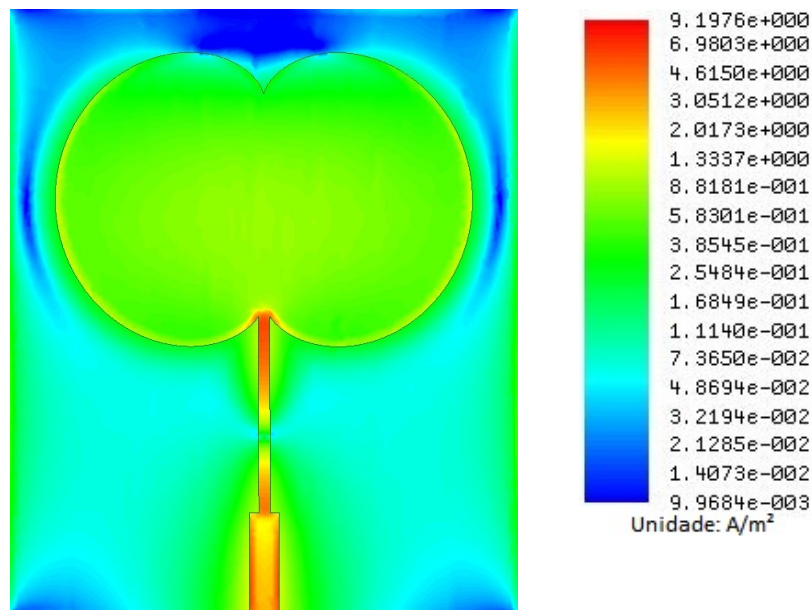
Para a medição em laboratório, a primeira banda tem a frequência de ressonância em 2,715 GHz, com a frequência inferior da banda em 2,671 GHz e a superior em 2,750 GHz. Obtendo uma largura de banda de 79 MHz.

A segunda banda de operação apresenta a frequência inferior em 3,756 GHz e a superior em 3,826 GHz. Desse modo, a largura é igual a 70 MHz com ressonância em 3,791 GHz.

E por fim, a terceira banda de operações é de 5,410 a 5,568 GHz com ressonância em 5,489 GHz. A largura de banda é de 158 MHz.

A Figura 5.45 ilustra a distribuição de densidade de corrente do Projeto 5 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,698 GHz. Os valores de intensidade de densidade de corrente no elemento irradiante reduz a medida que se afasta do centro e aponta para a parte superior. As bordas laterais também apresentam valores de densidade de corrente mais elevados do que os comparados com o topo do elemento irradiante.

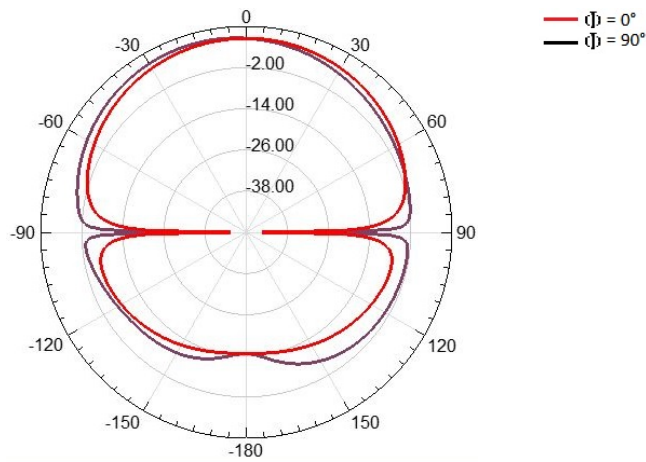
Figura 5.45: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem na frequência de 2,698 GHz do Projeto 5.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.46 apresenta o diagrama de irradiação 2D do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,698 GHz. O diagrama apresenta um lóbulo regular projetando para a frente da antena. Enquanto que para as costas da antena, um lóbulo irregular é projetado com menor intensidade do que para a frente.

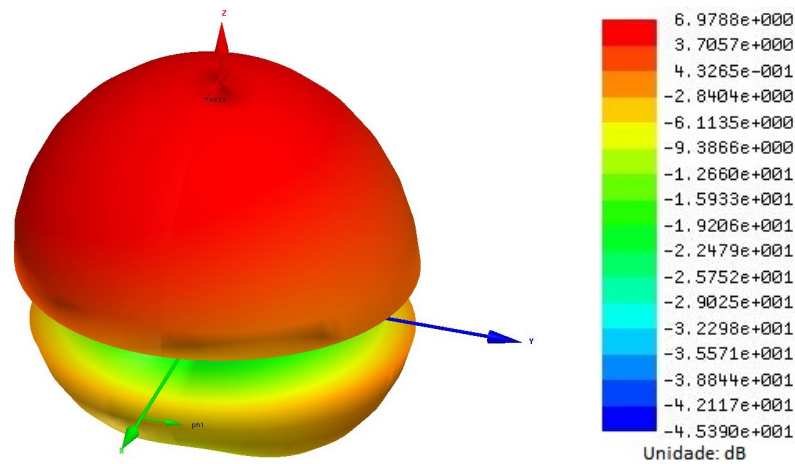
Figura 5.46: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,698 GHz do Projeto 5.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,698 GHz é apresentado na Figura 5.47. Pode ser observado que é formado apenas um lóbulo com ganho máximo de 6,98 dB.

Figura 5.47: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,698 GHz do Projeto 5.

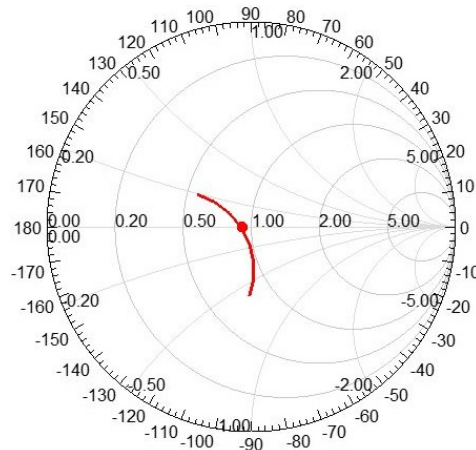


Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.48 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,698 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9174 - j0,0248$.

Figura 5.48: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,698 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω,

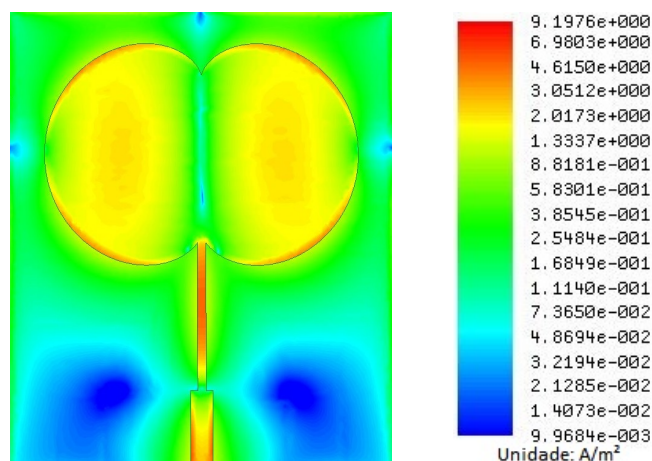
$$Z = 0,9174 - j0,0248.$$



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 5 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz é apresentado na Figura 5.49. A densidade no elemento irradiante é maior nas laterais, principalmente, nas bordas. Enquanto que no meio do elemento irradiante, a intensidade de densidade de corrente atinge os menores valores.

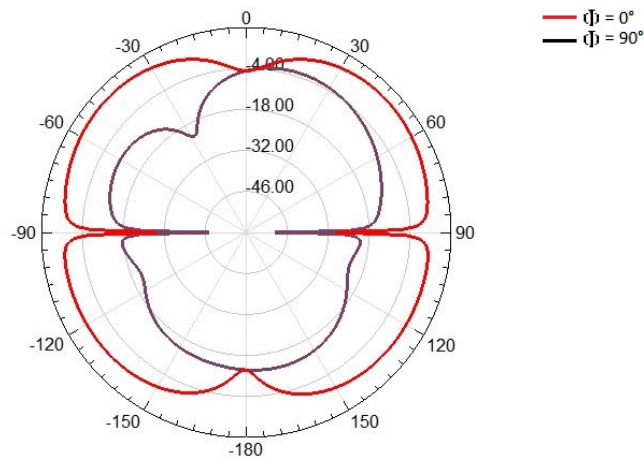
Figura 5.49: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz do Projeto 5.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Como esperado pelo diagrama de irradiação 2D do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz, ilustrado na Figura 5.50, apresenta dois lóbulos principais simétricos irradiando para as laterais da antena, tanto na parte frontal como posterior.

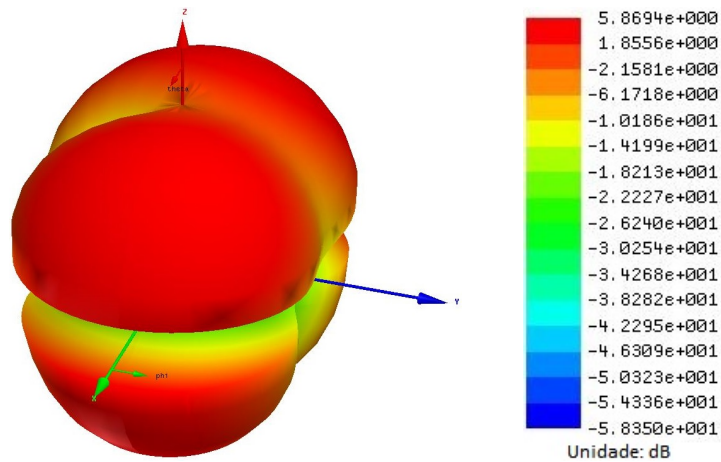
Figura 5.50: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz do Projeto 5.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz é apresentado na Figura 5.51. O ganho máximo é de 5,87 dB.

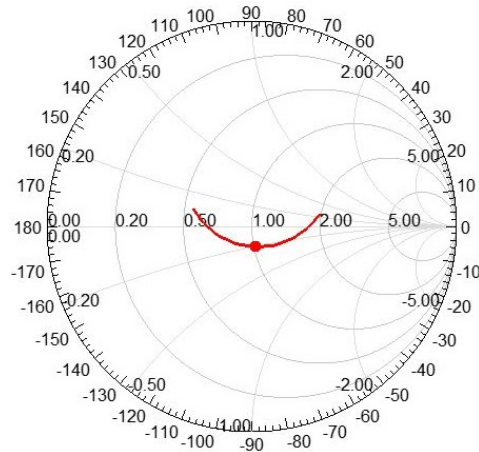
Figura 5.51: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,767 GHz do Projeto 5.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.52 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3 GHz do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,767 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0573 - j0,2085$.

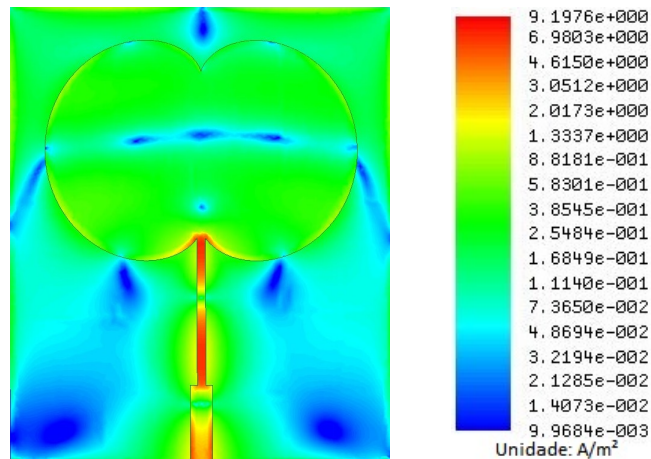
Figura 5.52: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3 GHz do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,767 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 1,0573 - j0,2085$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 5 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz é ilustrada na Figura 5.53. As maiores densidades de correntes no elemento irradiante estão localizadas na parte superior e inferior. A simetria bilateral é mantida.

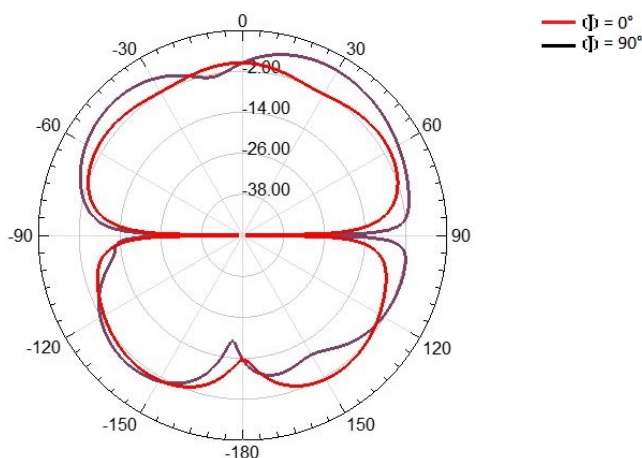
Figura 5.53: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz do Projeto 5.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz, ilustrado na Figura 5.54. A resposta do campo irradiado é mais complexo e irregular, apresentando múltiplos lóbulos.

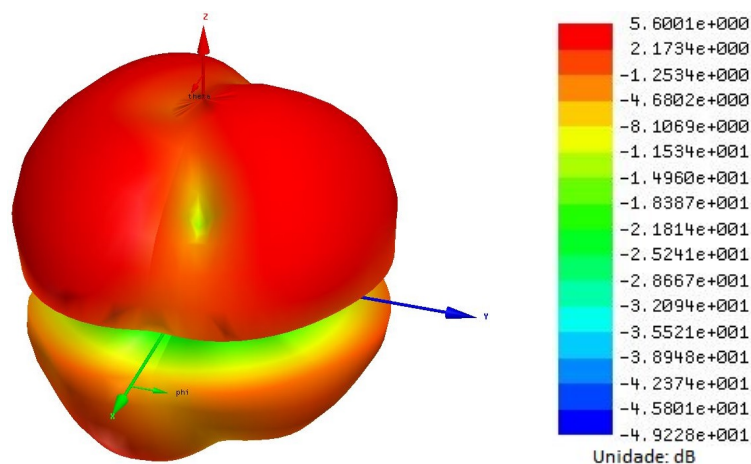
Figura 5.54: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz do Projeto 5.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.55 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz. O ganho máximo é de 5,60 GHz.

Figura 5.55: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,454 GHz do Projeto 5.

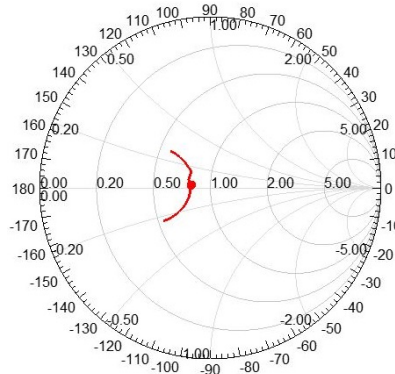


Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.56 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,454 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8285 - j0,0282$.

Figura 5.56: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 5 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,454 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω,

$$Z = 0,8285 - j0,0282.$$



Fonte: Autoria própria, 2020.

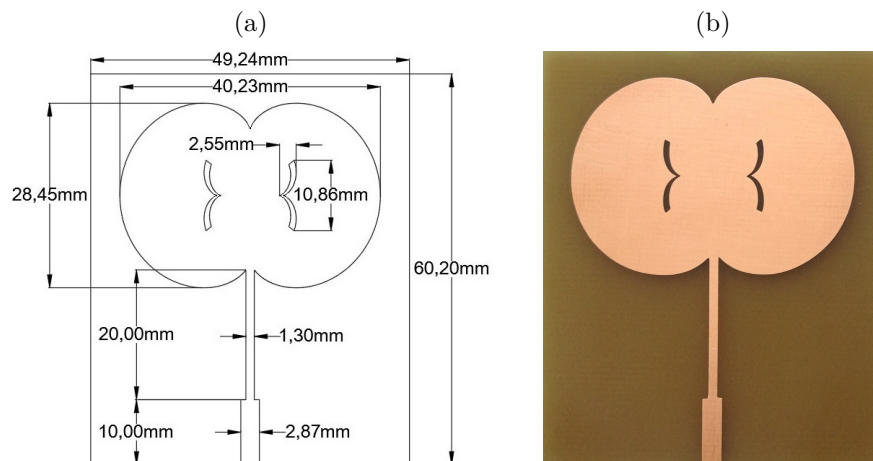
5.2.3 Projeto 6: Antena *Patch* Nefroide com Fenda para 2,687 GHz, 3,506 GHz e 5,411 GHz

Como continuação do Projeto 5, é incluso a fenda catacústica no Projeto 6. Com essa antena é possível sintonizar 4 bandas nos limites de interesse estabelecidos em projeto. No entanto, três delas estão como objetivos de interesse dessa dissertação.

O elemento irradiante tem como raio da circunferência base, A , igual a 5,03 mm, gerando um elemento irradiante de comprimento, $H_{ele.irr}$, igual a 28,45 mm e de largura, $W_{ele.irr}$, 40,23 mm. A fenda tem comprimento, $L_{fenda.nef}$, igual a 11,905 mm e um ângulo de abertura, $2\pi/\theta_f$, de 1,903 radianos. E o transformador de quarto de onda apresenta 20 mm de comprimento e 1,3 mm de largura.

A Figura 5.57(a) ilustra o desenho da antena e a Figura 5.57(b), a antena fabricada.

Figura 5.57: Antena *patch* nefroide com fenda projetada para as bandas de 3,5 GHz e 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.

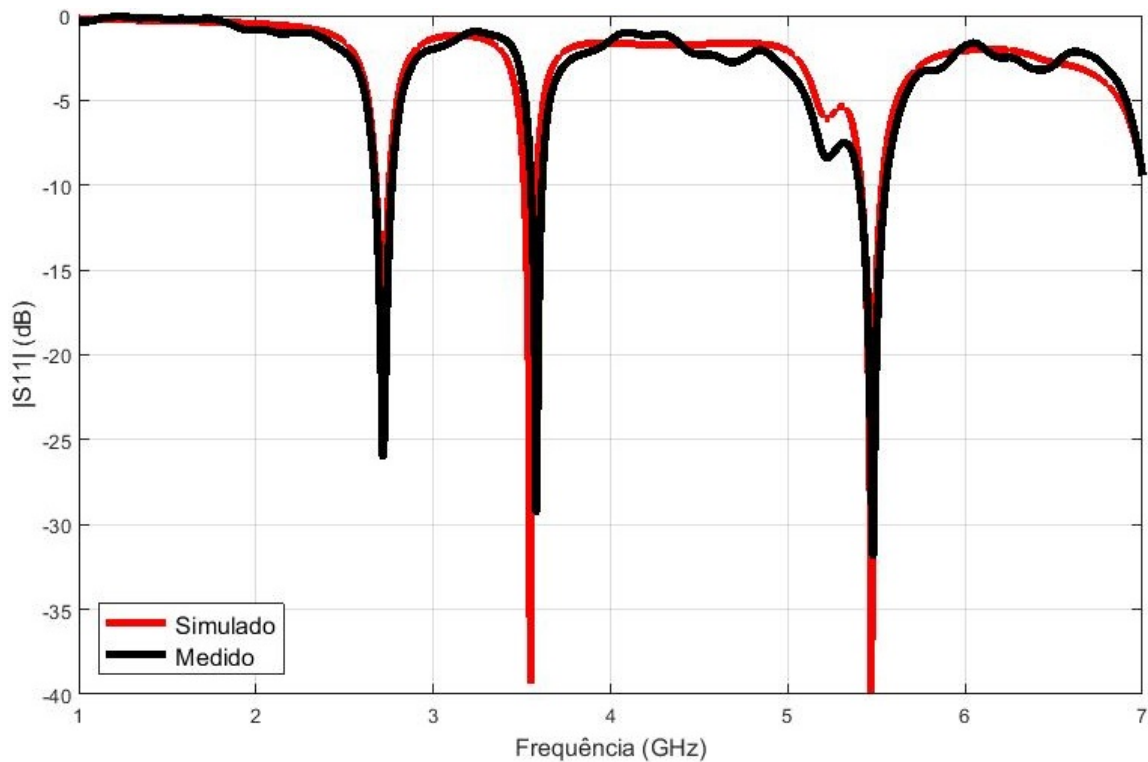


Fonte: Autoria própria, 2020.

O resultado medido em laboratório apresenta a primeira banda é de 2,680 a 2,759 GHz, gerando uma largura de 79 MHz. A frequência de ressonância é de 2,715 GHz. Para a segunda banda de interesse, a frequência de ressonância é 3,581 GHz, com a largura de banda igual a 53 MHz, variando de 3,555 a 3,608 GHz. E por fim, a terceira banda de interesse apresenta a ressonância em 5,480 GHz, com uma largura de banda de 140 MHz, cuja frequência inferior é de 5,410 GHz e a superior de 5,550 GHz. A banda de 7,011 a 7,178 GHz com ressonância em 7,090 não está presente nos limites de estudos deste trabalho. Podendo ser estudada como expansão dessa dissertação.

A Figura 5.58 apresenta a comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* cardioide com fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 e 5 GHz. As duas curvas de respostas estão similares, apesar de um pequena diferença para a banda de 3,5 GHz.

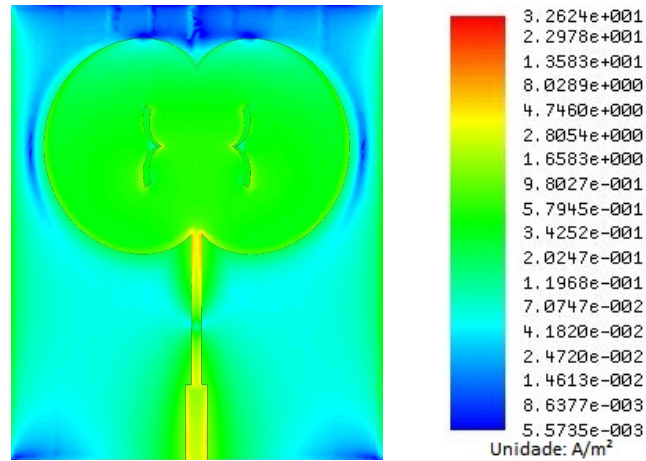
Figura 5.58: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* nefroide com fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 e 5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 6 simulada para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz é ilustrada na Figura 5.59. É possível observar que distribuição de densidade de corrente se mantém homogênea.

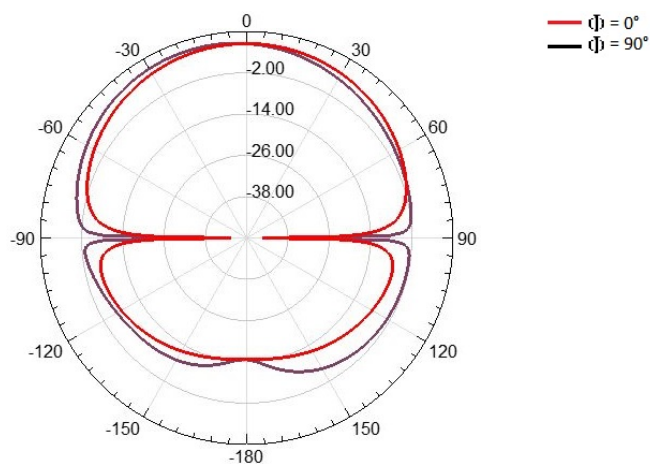
Figura 5.59: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autorial própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz é apresentado na Figura 5.60, em que é visível o lóbulo frontal e dois lóbulos posteriores.

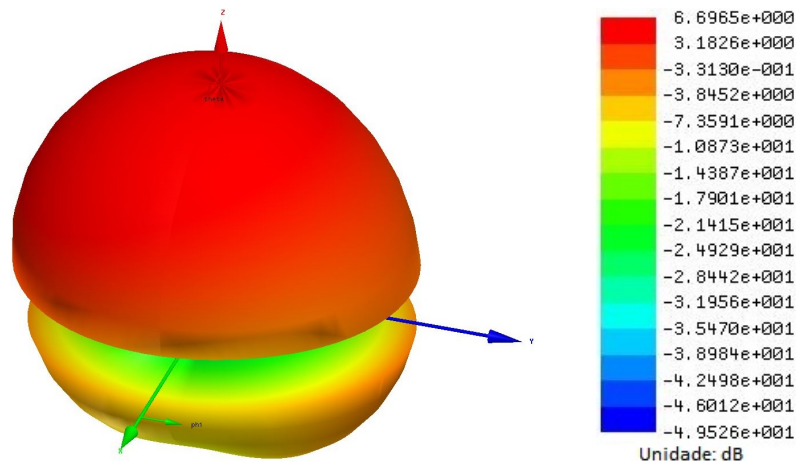
Figura 5.60: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autorial própria, 2020.

A Figura 5.61 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz. O ganho máximo é de 6,70 dB irradiando para a frente da antena.

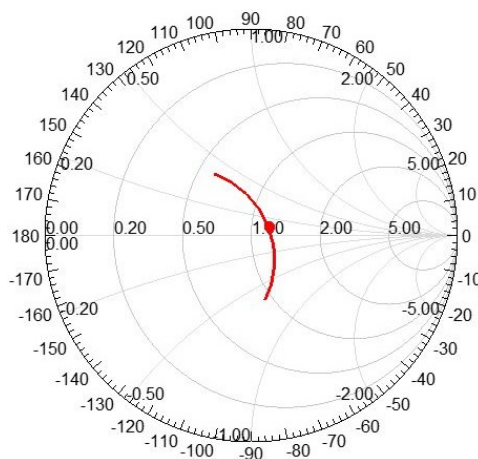
Figura 5.61: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 2,687 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.62 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda, cuja a frequência de 2,687 GHz apresenta impedância normalizada, $Z = 1,1818 - j0,0673$, para 50Ω .

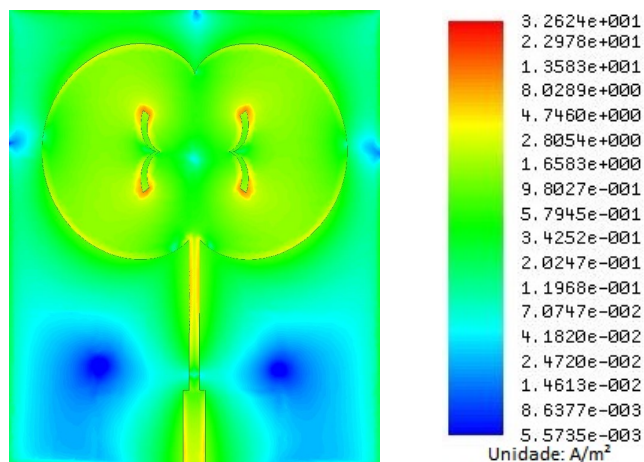
Figura 5.62: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda, cuja a frequência de 2,687 GHz apresenta impedância normalizada, $Z = 1,1818 - j0,0673$, para 50Ω .



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para a distribuição de densidade de corrente do Projeto 6 simulada para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz, apresentada na Figura 5.63, as maiores densidades de corrente no elemento irradiante está nas bordas das fendas.

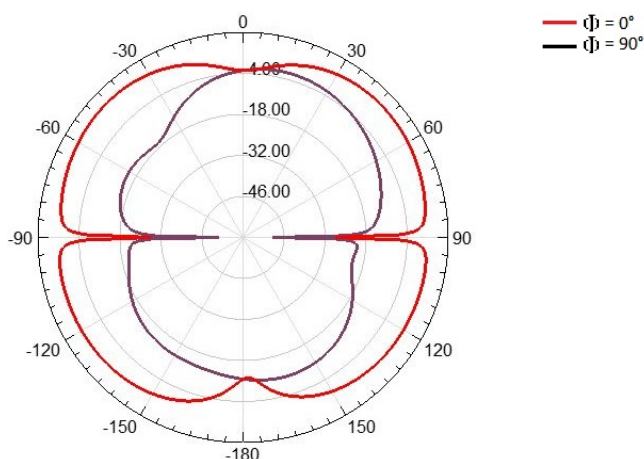
Figura 5.63: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.64, ilustra o diagrama de irradiação 2D do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz, em que é visível a presença de dois lóbulos frontais e dois posteriores.

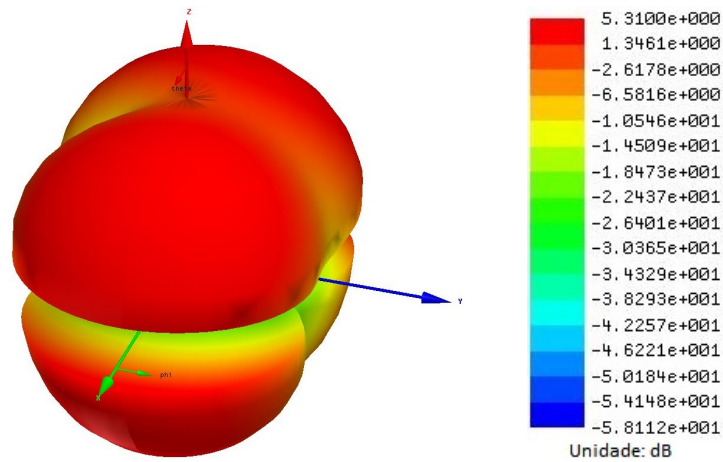
Figura 5.64: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz é apresentado na Figura 5.65. O ganho máximo 5,31 dB nos dois lóbulos simétricos e apontando para as laterais da antena, tanto na parte frontal como nas costas da antena.

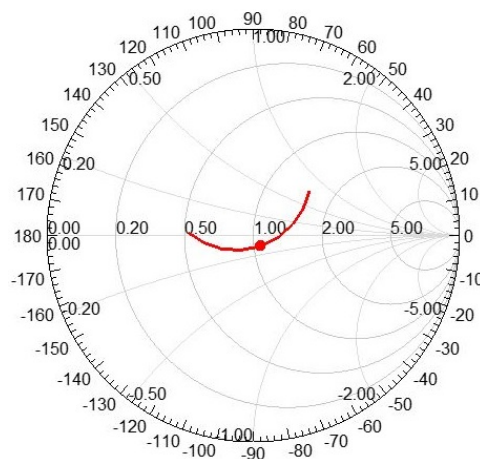
Figura 5.65: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide com fenda na frequência de 3,506 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.66 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda, cuja a frequência de 3,506 GHz apresenta impedância normalizada, $Z = 1,0875 - j0,1236$, para 50Ω .

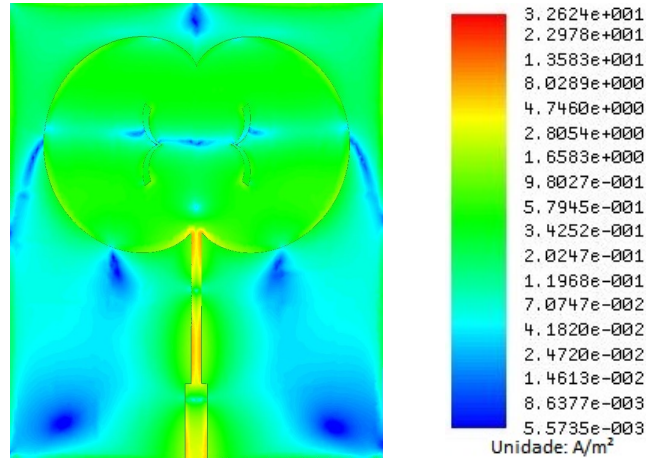
Figura 5.66: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda, cuja a frequência de 3,506 GHz apresenta impedância normalizada, $Z = 1,0875 - j0,1236$, para 50Ω .



Fonte: Autoria própria, 2020.

No entanto, a resposta da distribuição da densidade de corrente do Projeto 6 para a frequência 5,411 GHz sofre alteração, tornando-se mais irregular. A maior densidade de corrente no elemento irradiante se concentra na parte superior e na parte inferior, como apresentado na Figura 5.67, a qual apresenta distribuição de densidade de corrente do Projeto 6 simulada para a antena *patch* nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz.

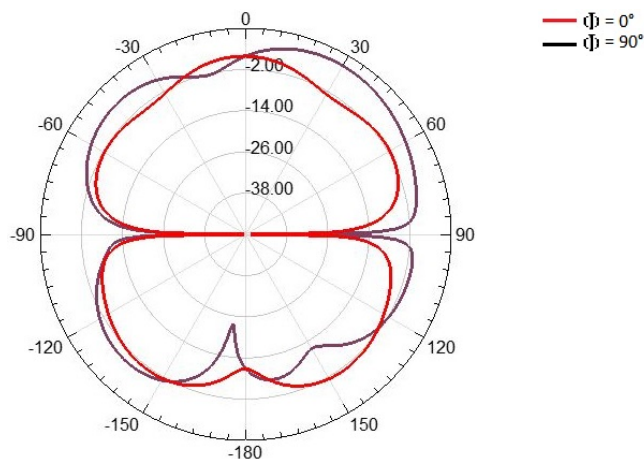
Figura 5.67: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz é apresentado na Figura 5.68. É perceptível a formação de lóbulos irregulares na frente e nas costas da antena.

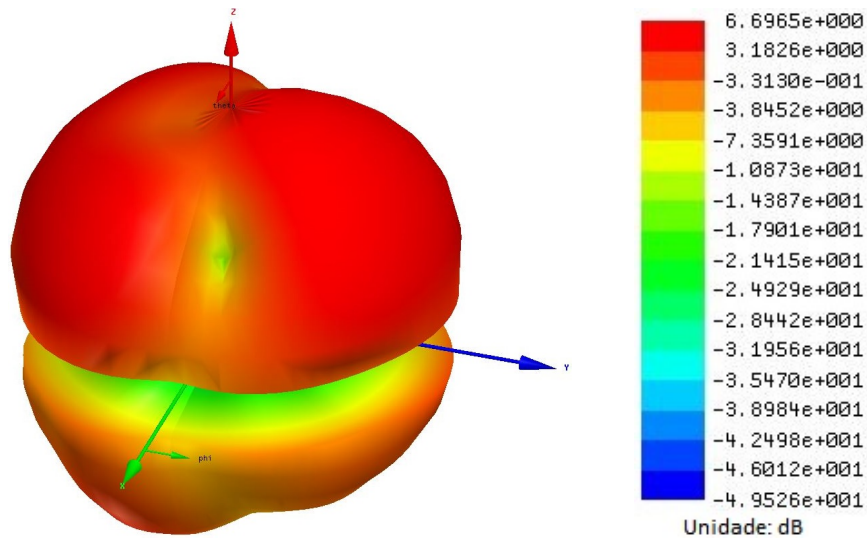
Figura 5.68: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.69 ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz, apresentando 6,70 dB de ganho máximo. A distribuição de irradiação é irregular na parte superior e inferior.

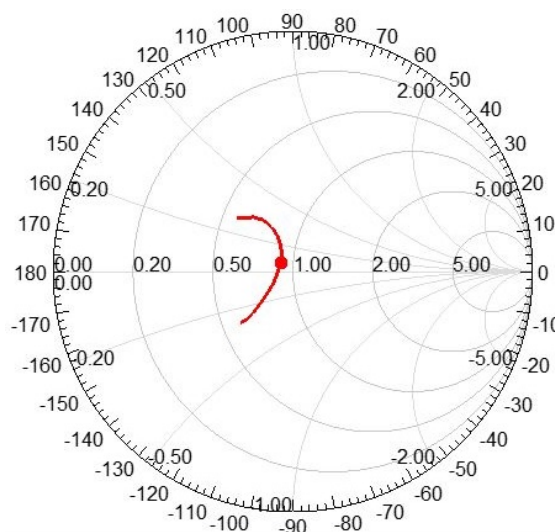
Figura 5.69: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide com fenda para a frequência 5,411 GHz do Projeto 6.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.70 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda, cuja a frequência de 5,411 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8238 + j0,0528$.

Figura 5.70: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 6 simulado para a antena *patch* nefroide com fenda, cuja a frequência de 5,411 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8238 + j0,0528$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

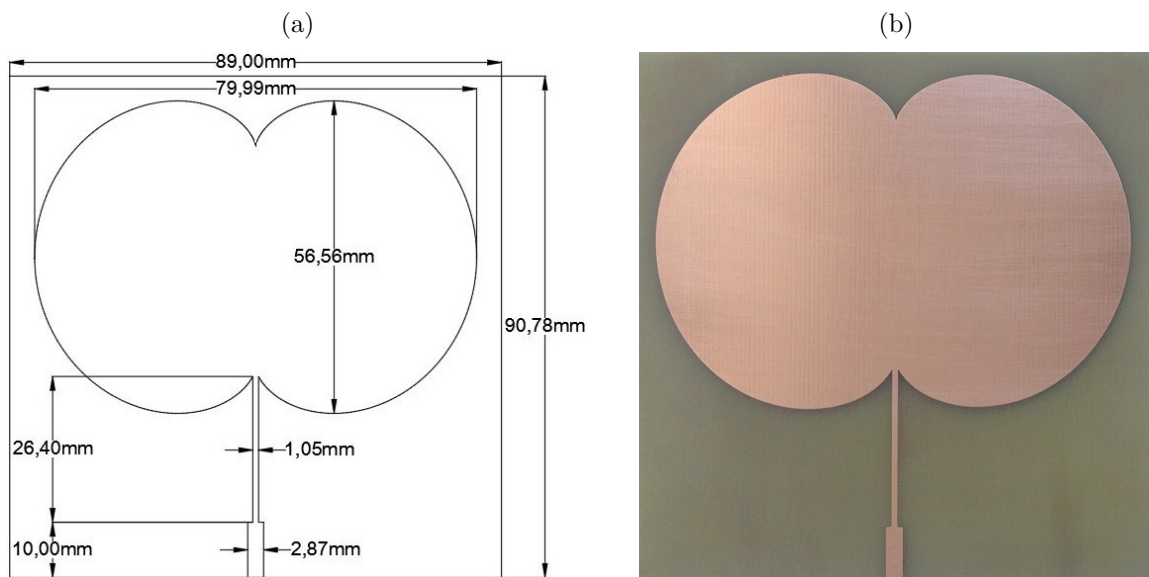
5.2.4 Projeto 7: Antena *Patch* Nefroide sem Fenda para 2,732 GHz, 3,540 GHz, 5,623 GHz e 6,604 GHz

A antena *patch* nefroide do Projeto 7 não apresenta fenda e sintoniza três frequências de ressonâncias nas bandas de interesse: WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz. O transformador de quarto de onda realiza o casamento de impedâncias e privilegiam as bandas de interesse.

O elemento irradiante tem 56,56 mm de comprimento, $H_{ele.irr}$, por 79,99 mm de largura, $W_{ele.irr}$, com uma circunferência base de raio, A , igual a 10 mm. O transformador de quarto de onda tem 26,4 mm de comprimento, L_{qwt} , e 1,05 mm de largura, W_{qwt} .

A Figura 5.71a apresenta o leiaute desenhado para a antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz e a Figura 5.71b ilustra a antena fabricada, a qual foi submetida às medições em laboratório. A antena mede 89 mm de largura por 90,78 mm de comprimento.

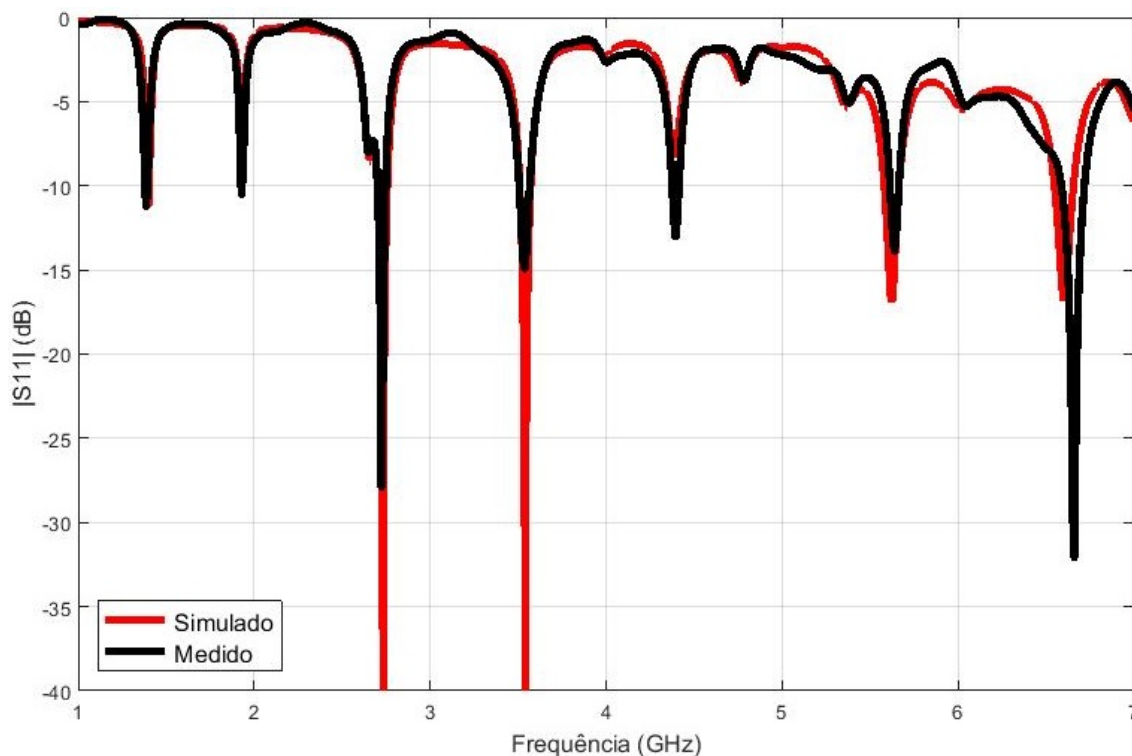
Figura 5.71: Antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.72 apresenta a comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de WLAN 2,4 GHz, WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz. A medição dos módulos de coeficientes de reflexão em laboratório está de acordo com o simulado por *software*. Muitas frequências de ressonâncias foram obtidas, cabendo ao transformador de quarto de onda privilegiam uma banda ou outra.

Figura 5.72: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de WLAN 2,4 GHz e WLAN 5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Para a medição em laboratório, a primeira banda tem a frequência de ressonância igual a 2,724 GHz. A largura de banda é de 35 MHz, variando da frequência mínima de 2,706 GHz a máxima de 2,741 GHz. Enquanto que a banda de WMAN 3,5 GHz ocupou a segunda banda de interesse, variando de 3,511 a 3,564 GHz, equivalente a uma largura de 53 MHz e tendo como frequência de ressonância 3,538 GHz.

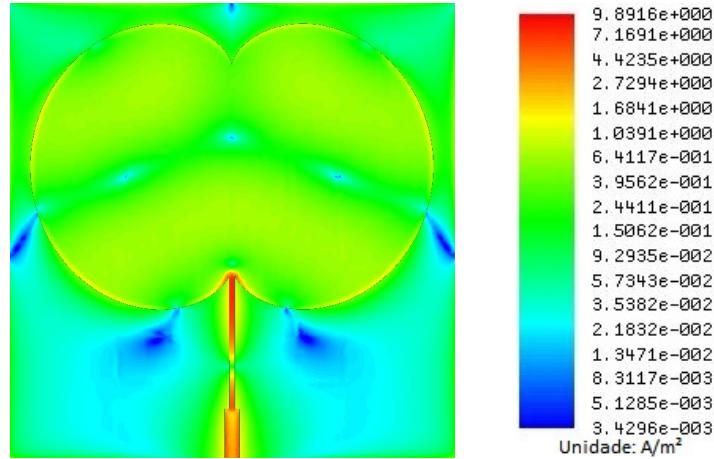
Também tem-se a presença de faixa de frequências na banda de 4 GHz, com a ressonância em 4,395 GHz. Essa banda obteve a frequência mínima igual a 4,378 GHz e a máxima igual a 4,413 GHz, equivalente a uma largura de banda de 35 MHz.

Para a banda de WLAN de 5 GHz, a ressonância acontece em 5,638 GHz e apresenta uma largura de banda de 35 MHz, variando de 5,620 a 5,655 GHz.

E por fim, uma pequena discrepância acontece entre a antena fabricada e a simulação acontece na banda de 6 GHz. O módulo de coeficiente de reflexão, $|S_{11}|$, da antena para essa banda é muito menor na simulação, enquanto que com medição, obteve-se valores abaixo de -30 dB. A frequência de ressonância é igual a 6,661 GHz. A largura de banda de 123 MHz, com a frequência mínima igual a 6,591 GHz e a máxima de 6,714 GHz.

A Figura 5.73 apresenta a distribuição de densidade de corrente do Projeto 7 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz. É possível observar que a maior densidade de corrente no elemento irradiante se concentra na parte superior e na parte inferior, com uma linha tendendo a letra v invertido como divisão.

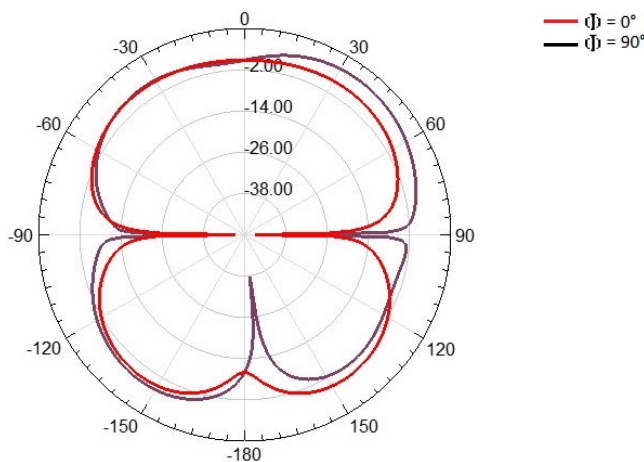
Figura 5.73: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Como esperado, devido à distribuição de densidade de corrente, o diagrama de irradiação 2D do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz é irregular, ilustrado na Figura 5.74, apresenta um lóbulo principal frontal. Além de dois lóbulos posteriores irregulares.

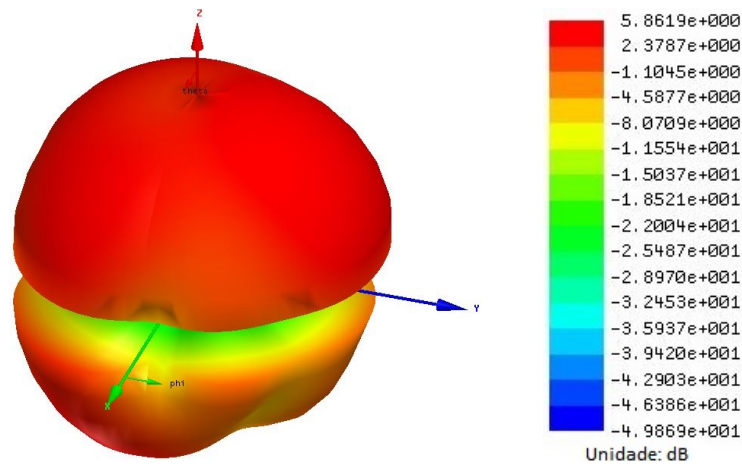
Figura 5.74: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.75 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz. O valor de ganho máximo é igual a 5,87 dB.

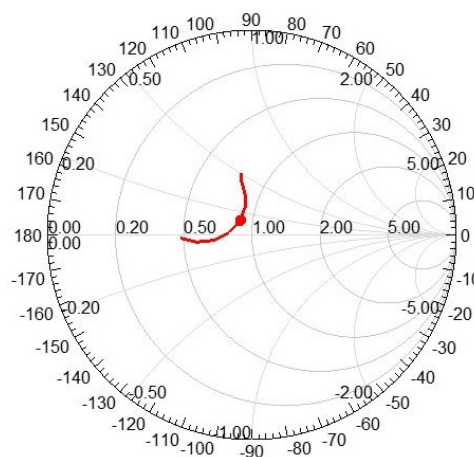
Figura 5.75: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,732 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.76 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,732 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8787 + j0,1183$.

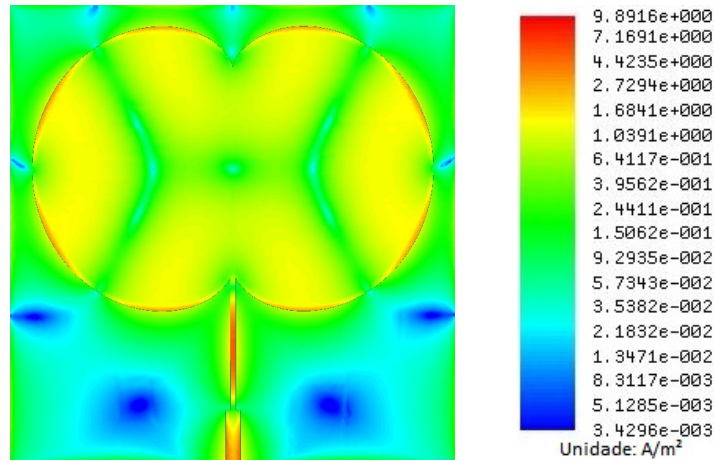
Figura 5.76: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,732 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8787 + j0,1183$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 7 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz é não é homogênea como é ilustrada na Figura 5.77, mas é mantido a simetria bilateral. Também é observável que em três parte os valores de densidade de corrente no elemento irradiante se tornam mínimos no eixo centro e horizontal da antena.

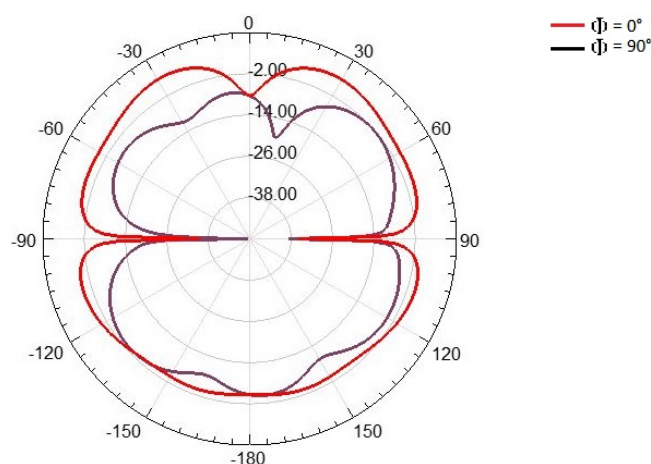
Figura 5.77: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Conforme ilustrado no diagrama de irradiação 2D do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz, Figura 5.78, múltiplos lóbulos no diagrama de irradiação foram formados. A propagação ocorre para as laterais da antena e é mantido a simetria bilateral conforme esperado pela distribuição de densidade de corrente.

Figura 5.78: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz do Projeto 7.

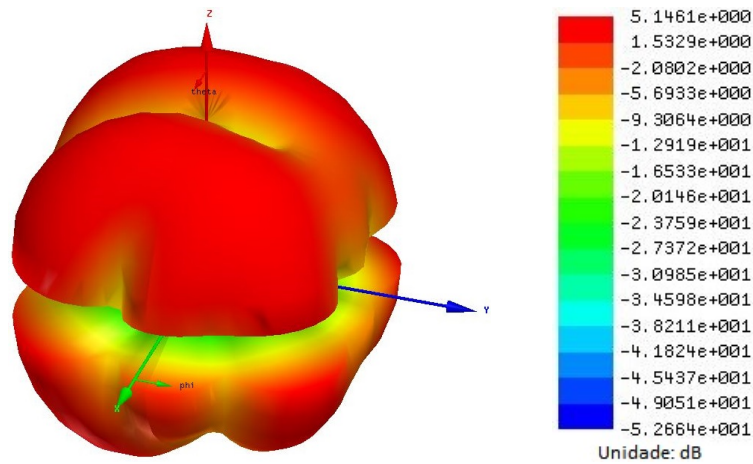


Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.79 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz. É possível observar melhor a resposta do diagrama de irradiação da antena quanto a irradiação da antena. O máximo

ganho é de 5,15 dB. A irradiação ocorre para as laterais antenna com a linha central apresentando valores mínimos de intensidade de irradiação.

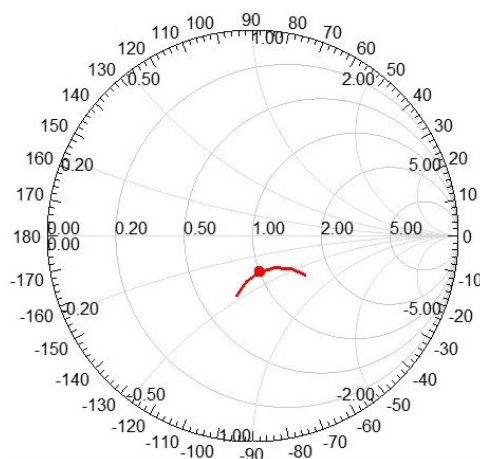
Figura 5.79: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antenna *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,540 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.80 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 7 simulado para a antenna *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,540 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0006 - j0,3382$.

Figura 5.80: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 7 simulado para a antenna *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,540 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0006 - j0,3382$.

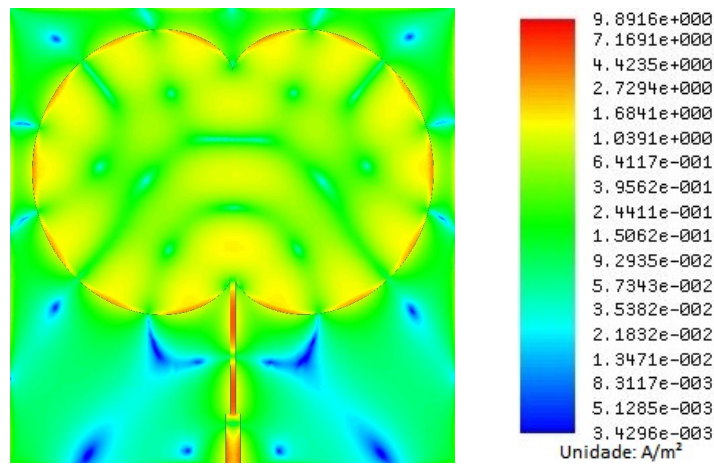


Fonte: Autoria própria, 2020.

Para a banda WLAN de 5 GHz, a resposta não homogênea da distribuição da densidade de corrente é mantido. Entretanto, com um número maior de pontos com valores mínimos de densidade de corrente. A Figura 5.81 ilustra a distribuição de densidade de

corrente do Projeto 7 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz da antena do Projeto 7.

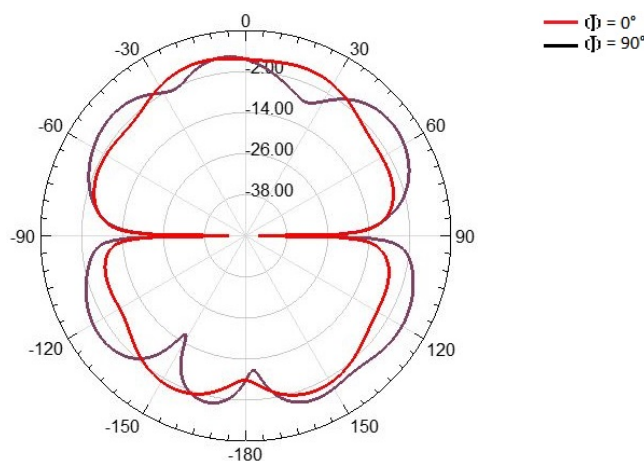
Figura 5.81: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.82 apresenta o diagrama de irradiação 2D do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz. A antena apresenta múltiplos lóbulos projetando para a frente da antenas, assim como para as costas.

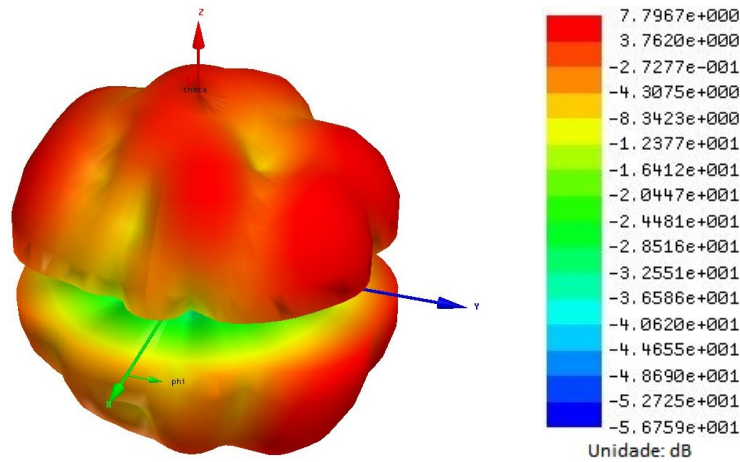
Figura 5.82: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Na Figura 5.83, é apresentado o diagrama de irradiação 3D do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz. Os lóbulos são irregulares e apresentam o ganho máximo de 7,80 dB.

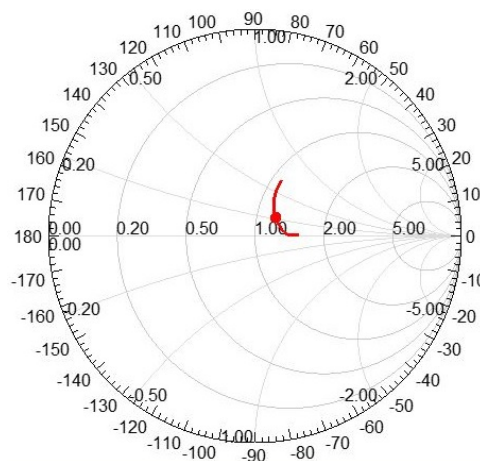
Figura 5.83: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda para a frequência 5,623 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.84 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,623 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,1461 + j0,2100$.

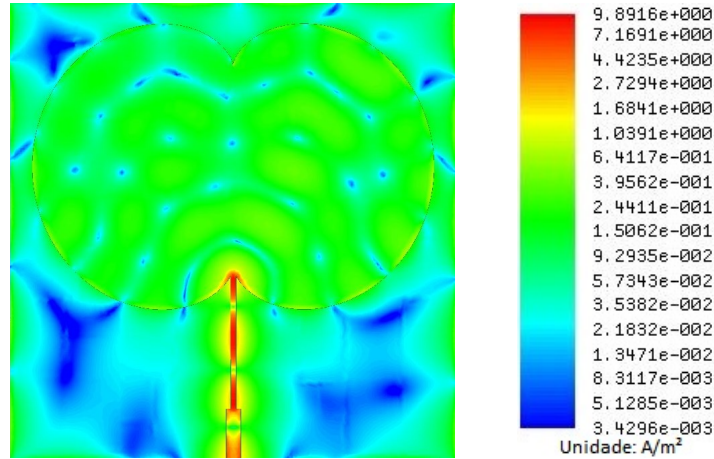
Figura 5.84: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,623 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,1461 + j0,2100$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 7 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz, Figura 5.85, se apresenta de forma irregular variando entre regiões de maiores e de menores valores de intensidade de densidade de corrente. A simetria bilateral é mantida.

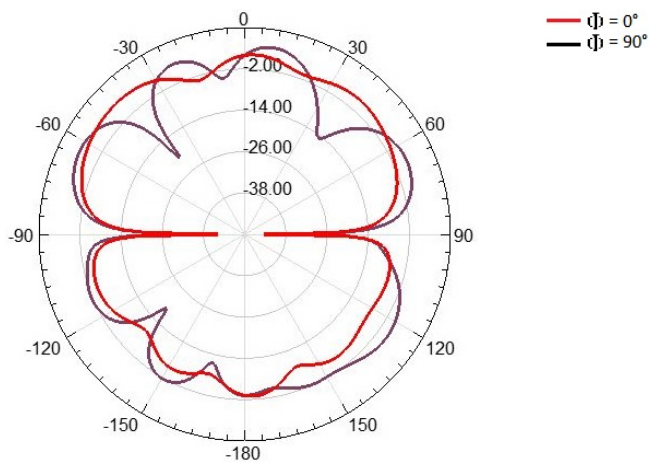
Figura 5.85: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz, Figura 5.86, apresenta bastante irregular com múltiplos lóbulos. Nenhum dos lóbulos é de relevância em relação aos outros.

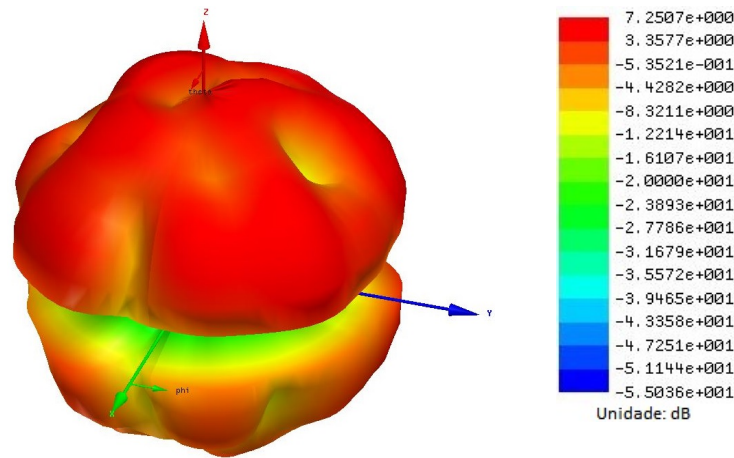
Figura 5.86: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.87 ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz. A antena propaga para todas as direções frontais da antena de modo irregular, tendo como o seu máximo ganho igual a 7,25 dB.

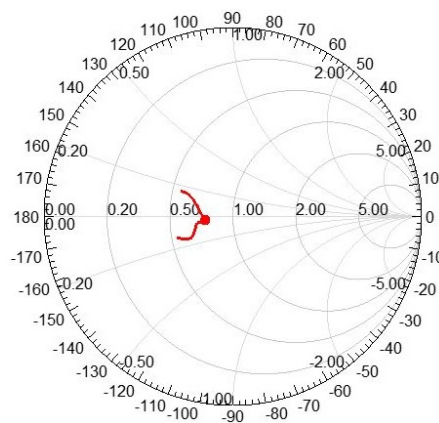
Figura 5.87: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 6,604 GHz do Projeto 7.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.88 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 6,604 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,7289 - j0,0293$.

Figura 5.88: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 7 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 6,604 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,7289 - j0,0293$.



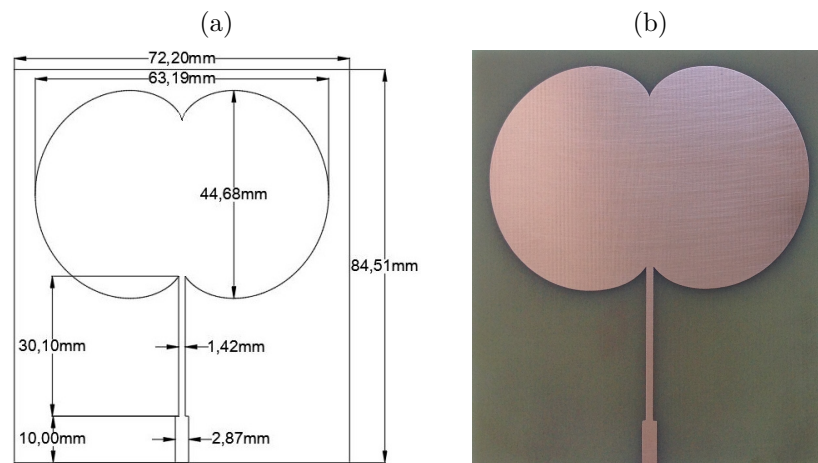
Fonte: Autoria própria, 2020.

5.2.5 Projeto 8: Antena *Patch* Nefroide sem Fenda para 1,748 GHz, 2,432 GHz, 3,490 GHz e 5,548 GHz

Com o raio da circunferência base, A , igual a 7,9 mm, é gerado um elemento irradiante de comprimento, $H_{ele.irr}$, 44,68 mm e largura, $W_{ele.irr}$, 63,19 mm. O transformador de quarto de onda tem comprimento, L_{qwt} , igual a 30,10mm e largura, W_{qwt} , 1,42 mm.

O leiaute desenhado para a antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de 1800 MHz, 2,4 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz é apresentado na Figura 5.89(a). Enquanto que a Figura 5.89(b) ilustra a antena fabricada, a qual foi submetida à medição em laboratório.

Figura 5.89: Antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de 1800 MHz, 2,4 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

É constatado com a medição que a primeira banda é a de telefonia móvel para 1800 MHz com a frequência de ressonância em 1,744 GHz. A largura de banda é de 26 MHz com a frequência mínima de 1,735 GHz e a máxima de 1,761. No entanto, o processo de fabricação não atende ao simulado no quesito de módulo de coeficiente de reflexão, $|S_{11}|$, em que a simulação apresenta valores menores que -40 dB.

A segunda banda atendida é a de WLAN 2,4 GHz, apresentando uma largura de banda de 27 MHz, com a mínima de 2,426 GHz e a máxima de 2,453 GHz. A frequência de ressonância é 2,435 GHz. A terceira banda é a de WMAN 3,5 GHz, com ressonância em 3,485 GHz e largura de banda de 70 MHz. A frequência mínima é 3,450 GHz e a máxima é 3,520 GHz.

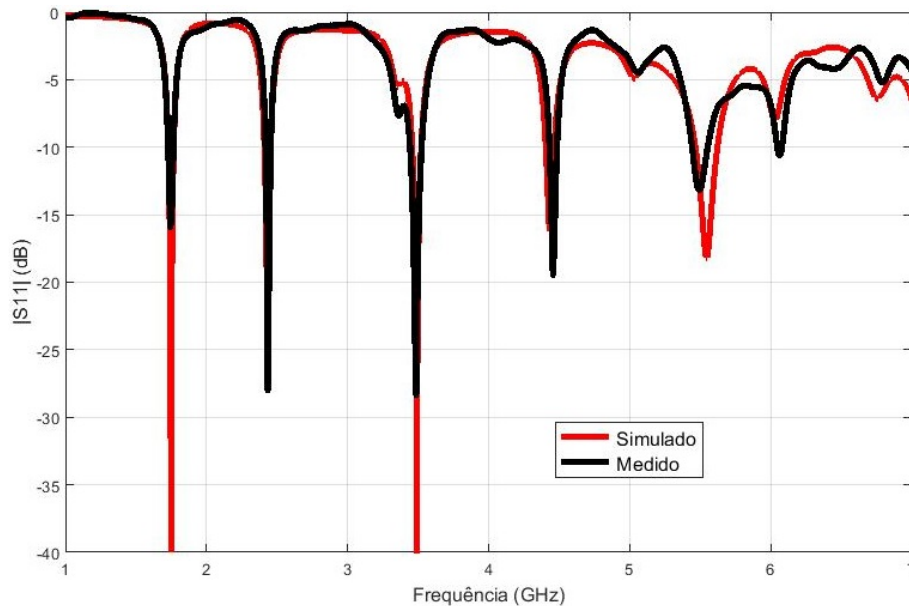
Para a banda de 4 GHz apresenta a frequência de ressonância em 4,456 GHz. A largura de banda é 44 MHz, com a frequência mínima na banda de 4,439 GHz e a máxima de 4,483 GHz.

Para WLAN 5 GHz, A largura é de 105 MHz, com a variação de 5,445 a 5,550 GHz e a frequência de ressonância em 5,498 GHz. No entanto, o transformador de quarto de onda é utilizado para fazer o ajuste de impedância das frequências inferiores, o que ocasiona baixo valor de módulo de coeficiente de reflexão, $|S_{11}|$, para as altas frequências.

Entretanto, a banda de 6,049 a 6,075 GHz, com ressonância em 6,066 GHz, não apresenta valores módulo de coeficiente de reflexão, $|S_{11}|$, menores que -10 dB na medição em laboratório e apresenta ressonância na simulação.

Os gráficos da comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de frequências de 1800 MHz, 2,4 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz são apresentados na Figura 5.90. Os resultados estão similares, o que é confirmado pela resposta das curvas de respostas dos módulos dos coeficientes de reflexão.

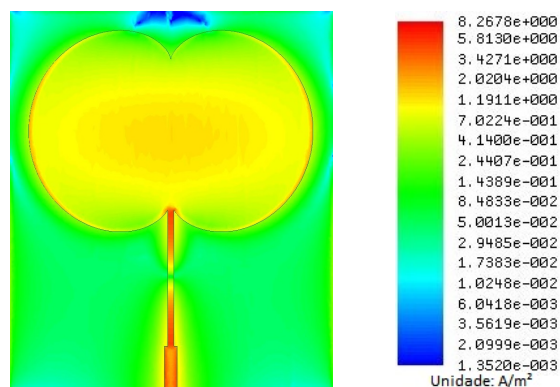
Figura 5.90: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* nefroide sem fenda projetada para as bandas de frequências de 1800 MHz, 2,4 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 8 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz é ilustrada na Figura 5.91. É possível observar que os maiores valores de intensidade densidade de corrente no elemento irradiante são maiores no centro e nas bordas laterais.

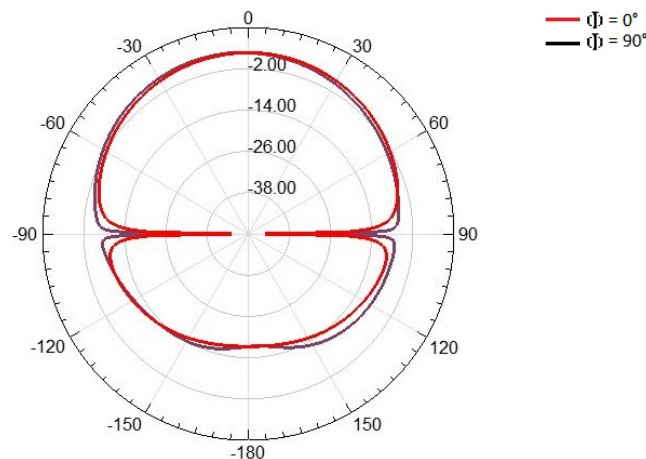
Figura 5.91: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz é apresentada na Figura 5.92. São apresentados apenas um lóbulo frontal e um posterior bem definidos.

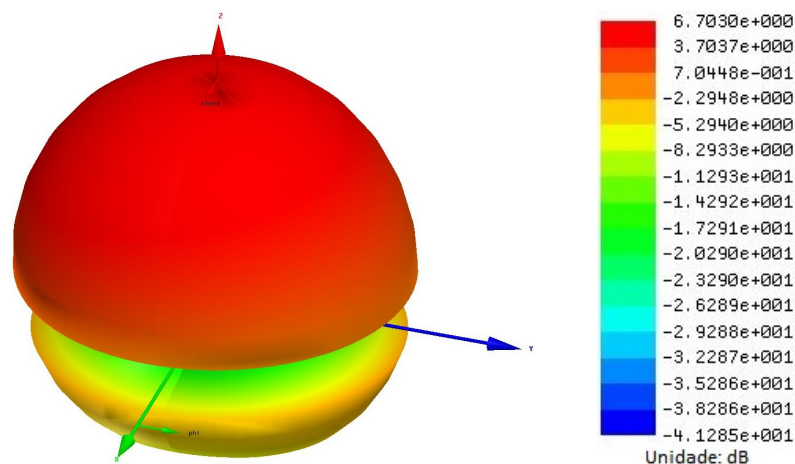
Figura 5.92: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.93 ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz. O ganho máximo é de 6,19 dB. Nesse diagrama de irradiação é visível os lóbulos frontal e posterior com o ganho máximo igual a 6,71 dB apontando para a frente da antena.

Figura 5.93: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 1,748 GHz do Projeto 8.

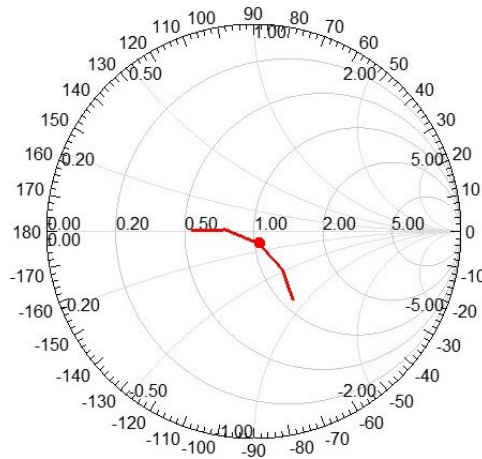


Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.94 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência

de 1,748 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0263 - j0,1065$.

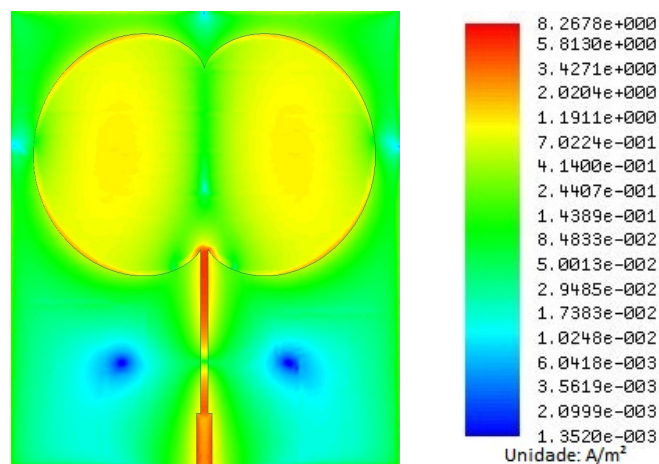
Figura 5.94: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 1,748 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0263 - j0,1065$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.95 apresenta a distribuição de densidade de corrente do Projeto 8 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,432 GHz. A intensidade de densidade de corrente no elemento irradiante aumenta em direção ao centro de cada uma das laterais. Enquanto que no eixo central vertical, alcança os os menores valores.

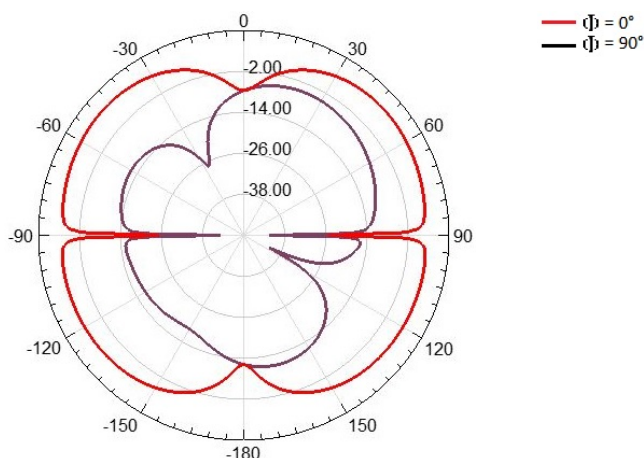
Figura 5.95: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,432 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,432 GHz é apresenta na Figura 5.96. Dois lóbulos frontais e dois posteriores são formados em direção as laterais da antena do Projeto 8.

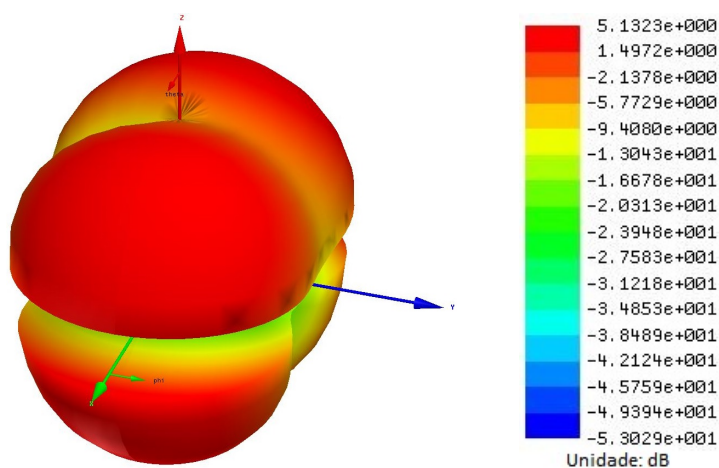
Figura 5.96: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,432 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Facilitando a visualização do diagrama de irradiação da antena 2D na frequência de 2,432 GHz da 5.96, a Figura 5.97 ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda para a banda de 2,4 GHz. Os quatro lóbulos apontam para as laterais do elemento irradiante com o ganho máximo de 5,13 dB.

Figura 5.97: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 2,432 GHz do Projeto 8.

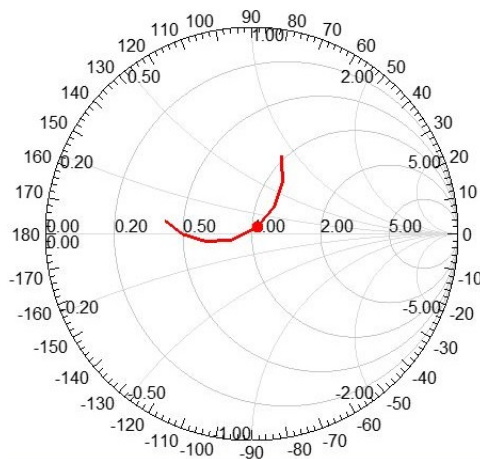


Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.98 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,432 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0491 + j0,0688$.

Figura 5.98: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2,4 GHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 2,432 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω,

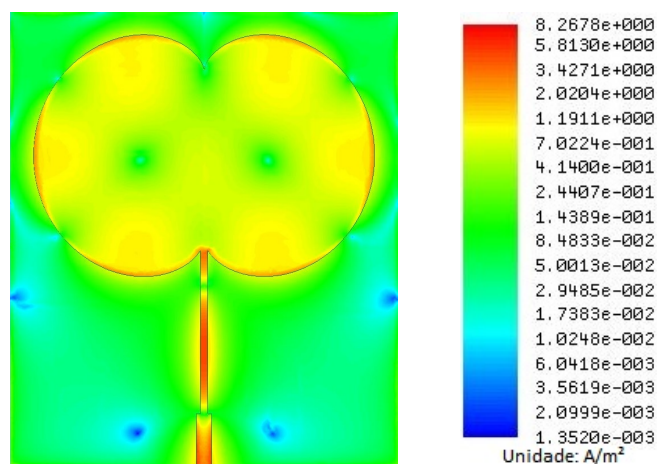
$$Z = 1,0491 + j0,0688.$$



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição densidade de corrente é irregular apresentando vários pontos de mínimos e máximos no elemento irradiante na frequência de 3,490 GHz. A qual apresenta vários pontos de máximo e mínimo no elemento irradiante, como ilustrado na distribuição de densidade de corrente do Projeto 8 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda para a banda de WMAN 3,5 GHz da Figura 5.99.

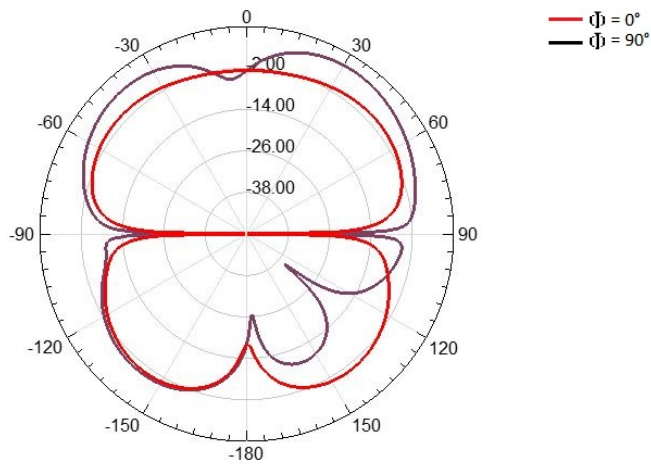
Figura 5.99: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,490 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Como consequência da tendência da não uniformidade da distribuição de corrente, o diagrama de irradiação apresenta múltiplos lóbulos. A Figura 5.100 apresenta o diagrama de irradiação 2D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,490 GHz.

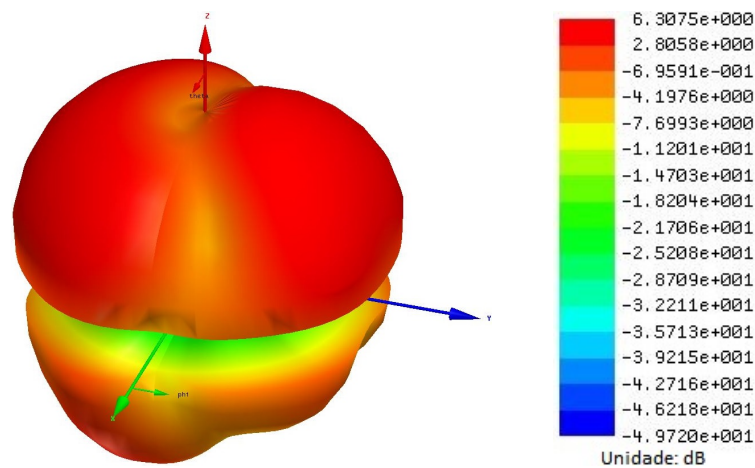
Figura 5.100: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,490 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,490 GHz é ilustrado na Figura 5.101. Nele é possível observar o ganho máximo de 6,31 dB. Além de lóbulos secundários, irradiando para as laterais e topo do elemento irradiante.

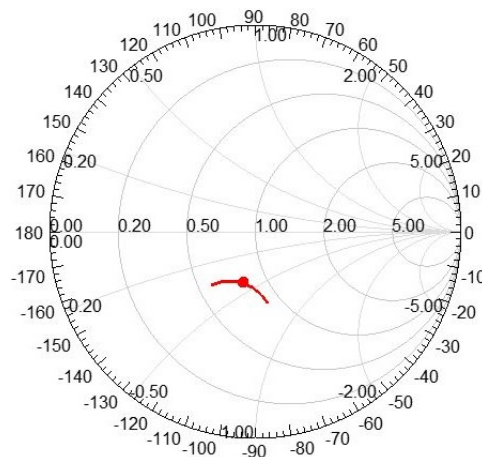
Figura 5.101: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 3,490 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.102 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,490 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,7737 - j0,4143$.

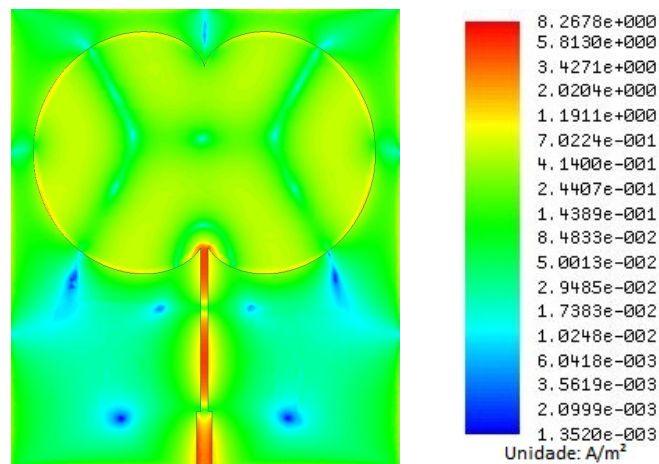
Figura 5.102: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 3,490 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,7737 - j0,4143$.



Fonte: Autorial própria, 2020.

A Figura 5.103 ilustra a distribuição de densidade de corrente do Projeto 8 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz. A densidade de corrente no elemento irradiante tende a formar faixas de valores mínimos.

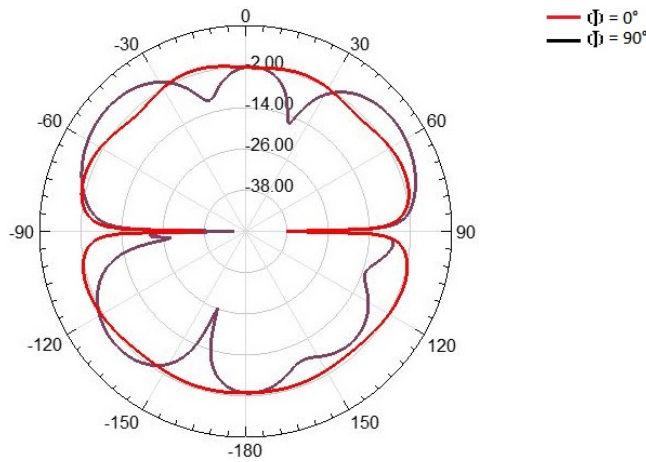
Figura 5.103: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autorial própria, 2020.

A Figura 5.104 apresenta o diagrama de irradiação 2D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz. É possível observar a formação de múltiplos lóbulos com simetria bilateral.

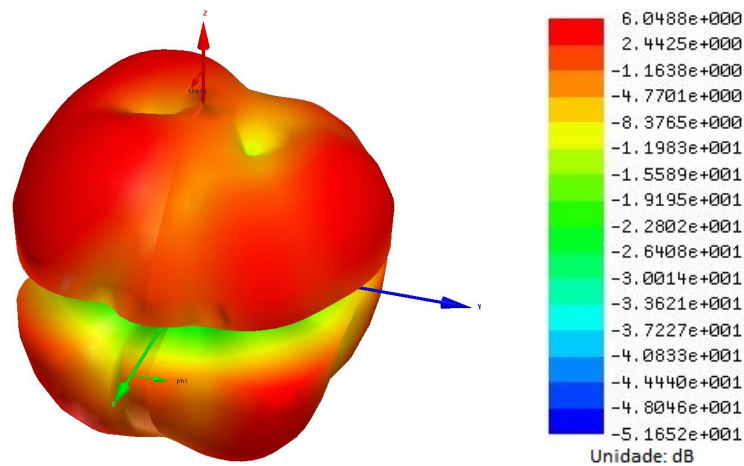
Figura 5.104: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz é apresentado na Figura 5.105. A formação de dois lóbulos principais de formatos irregulares são gerados com ganho máximo de 8,05 dB. A simetria bilateral é confirmada do diagrama é confirmada.

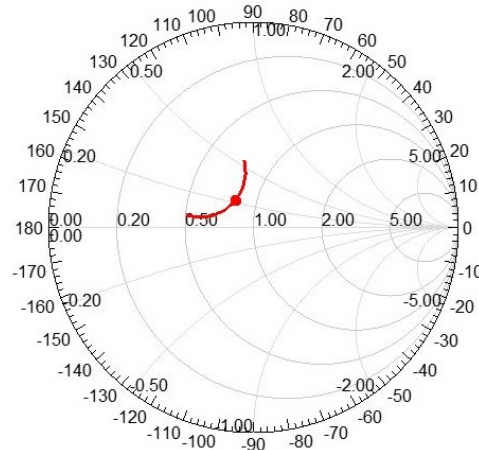
Figura 5.105: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 4,434 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.106 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 4 GHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 4,434 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,8020 + j0,2692$.

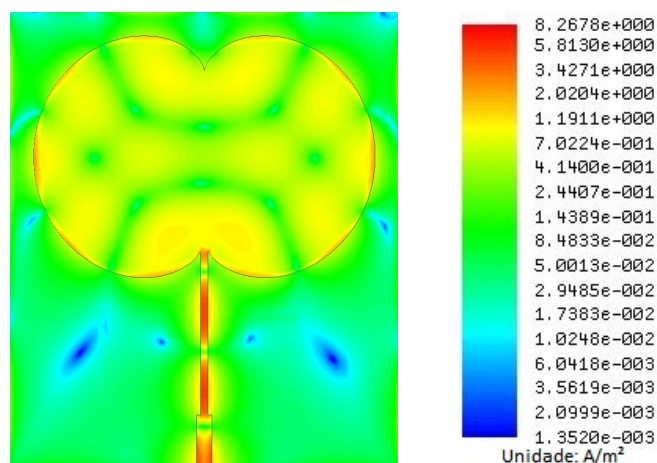
Figura 5.106: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 4 GHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 4,434 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,8020 + j0,2692$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.107 apresenta a distribuição de densidade de corrente do Projeto 8 simulada para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz. A distribuição de densidade de corrente no elemento irradiante se apresenta irregular apresentando vários pontos e faixas de mínimos e máximos. Entretanto, valores máximos de densidade de corrente não são obtidos nos elementos irradiantes.

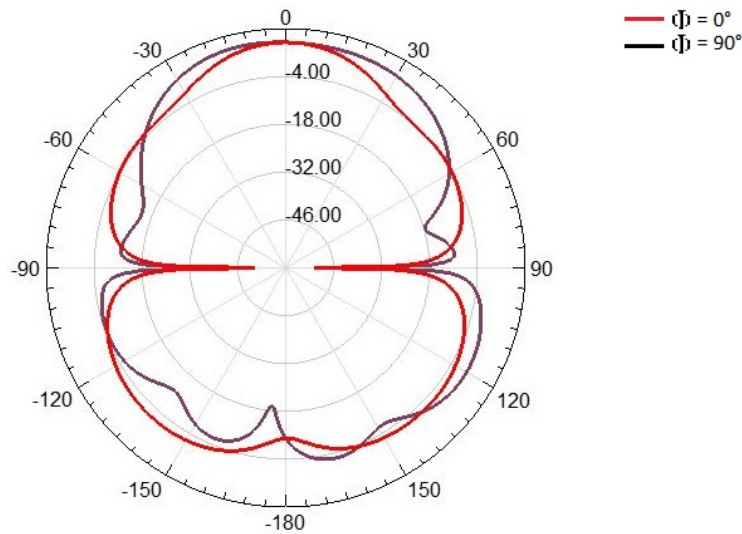
Figura 5.107: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

No diagrama de irradiação 2D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz, ilustrado na Figura 5.108, é possível observar que a formação de um lóbulo principal e ao redor dele surge lóbulos secundários. A resposta do campo irradiante é irregular.

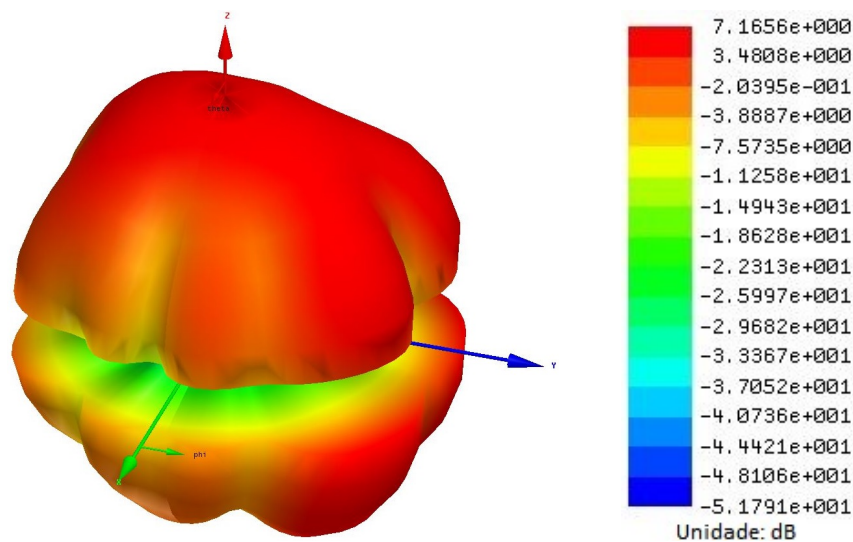
Figura 5.108: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz, apresentado na Figura 5.109. O ganho máximo é de 7,17 dB apontando para a frente da antena.

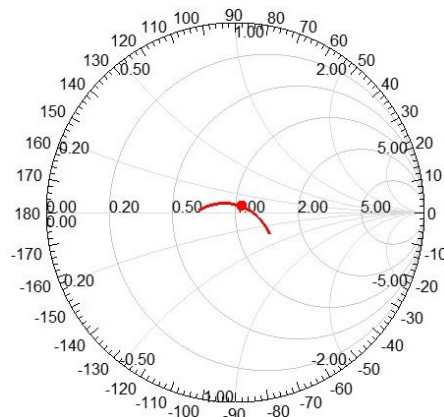
Figura 5.109: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* nefroide sem fenda na frequência de 5,548 GHz do Projeto 8.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.110 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,548 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0378 - j0,0905$.

Figura 5.110: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 8 simulado para a antena *patch* nefroide sem fenda, cuja a frequência de 5,548 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0378 - j0,0905$.

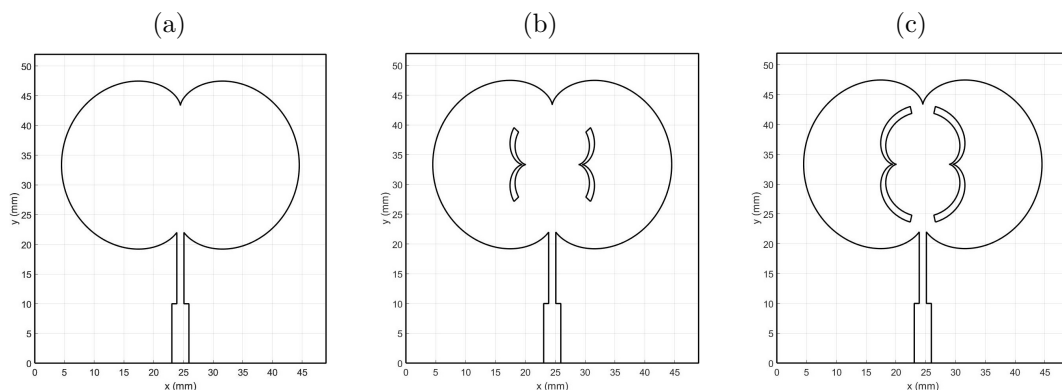


Fonte: Autoria própria, 2020.

5.2.6 Análise Paramétrica de Antenas *Patch* Nefroide com Fendas Catacáusticas

A Figura 5.111 apresenta a comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* nefroide desenhadas com auxílio do MATLAB[®] para $A = 5$ mm, $W_{qwt} = 1,2$ mm, $L_{qwt} = 12$ mm e $w_f = 0,6$ mm para vários valores de $2\pi/\theta_f$ utilizadas na análise paramétrica.

Figura 5.111: Comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* nefroide desenhadas com auxílio do MATLAB[®] para $A = 5$ mm, $W_{qwt} = 1,2$ mm, $L_{qwt} = 12$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para $2\pi/\theta_f$ igual a: (a) 0,000 rad; (b) 2,043 rad; (c) 2,856 rad.



Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020¹⁶.

¹⁶ O programa desenvolvido em MATLAB[®] para obtenção de leiautes para comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* nefroide para $A = 5$ mm, $W_{qwt} = 1,2$ mm, $L_{qwt} = 12$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Para avaliar os resultados do efeito das fendas sobre a sintonia de frequência, é admitido valores de $2\pi/\theta_f$ variando de 1,05 até 2,86 radianos ($6,0 \geq \theta_f \geq 2,2$). Essa variação da variável θ_f abrange um tamanho máximo de fenda até um tamanho mínimo. O tamanho do elemento irradiante, transformador de quarto de onda forma mantidos constantes.

A Tabela 5.4 apresenta as relações das frequências em porcentagem para antenas *patch* nefroide. A primeira faixa de frequências se mantém com variações mínimas com a alteração dos tamanhos das fendas, com variação de 0,46% entre os valores máximos e mínimos. A resposta para a primeira faixa pode ser considerado constante.

Enquanto que para a segunda faixa apresentou uma variação maior com a alteração dos tamanhos das fendas. Inicialmente, com valores superiores ao da primeira faixa, reduz a medida que os tamanhos das fendas aumentam. Quando as fendas são grandes demais, aproximadamente, $2\pi/\theta_f$ maior que 1,25 rad, as frequências de ressonância da Faixa 2 tem valores inferiores de frequências de ressonância em comparação a Faixa 1.

Tabela 5.4: Relações das frequências em porcentagem para antenas *patch* nefroide.

θ_f	$2\pi/\theta_f$ (rad)	$L_{fenda.nef}$ (mm)	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4
$+\infty$	0,0	0,0000	100% 2,750 GHz	100% 3,808 GHz	100% 5,192 GHz	100% 5,369 GHz
6,0	1,0472	3,7781	99,82%	99,92%	100,17%	99,96%
5,8	1,0833	4,0366	99,82%	99,79%	100,08%	99,96%
5,6	1,1220	4,3224	99,75%	99,79%	100,19%	99,96%
5,4	1,1636	4,6392	99,75%	99,74%	100,08%	99,96%
5,2	1,2083	4,9919	99,78%	99,66%	100,21%	99,96%
5,0	1,2566	5,3857	99,78%	99,55%	100,00%	99,94%
4,8	1,3090	5,8274	99,75%	99,34%	100,21%	99,94%
4,6	1,3659	6,3249	99,75%	99,13%	100,19%	99,91%
4,4	1,4280	6,8879	99,71%	98,87%	100,17%	99,89%
4,2	1,4960	7,5279	99,67%	98,40%	100,13%	99,89%
4,0	1,5708	8,2596	99,64%	97,79%	100,15%	99,83%
3,8	1,6535	9,1001	99,64%	96,93%	100,08%	99,78%
3,6	1,7453	10,0734	99,64%	95,82%	99,94%	99,61%
3,4	1,8480	11,2057	99,64%	94,09%	99,63%	99,53%
3,2	1,9635	12,5329	99,64%	91,94%	99,09%	99,37%
3,0	2,0944	14,1000	99,60%	88,92%	98,19%	99,03%
2,8	2,2440	15,9645	99,60%	84,90%	96,57%	98,58%
2,6	2,4166	18,2001	99,49%	79,62%	94,22%	97,95%
2,4	2,6180	20,9013	99,42%	72,87%	91,08%	97,09%
2,2	2,8560	24,1867	98,36%	-	87,23%	96,11%

Fonte: Autoria própria, 2020.

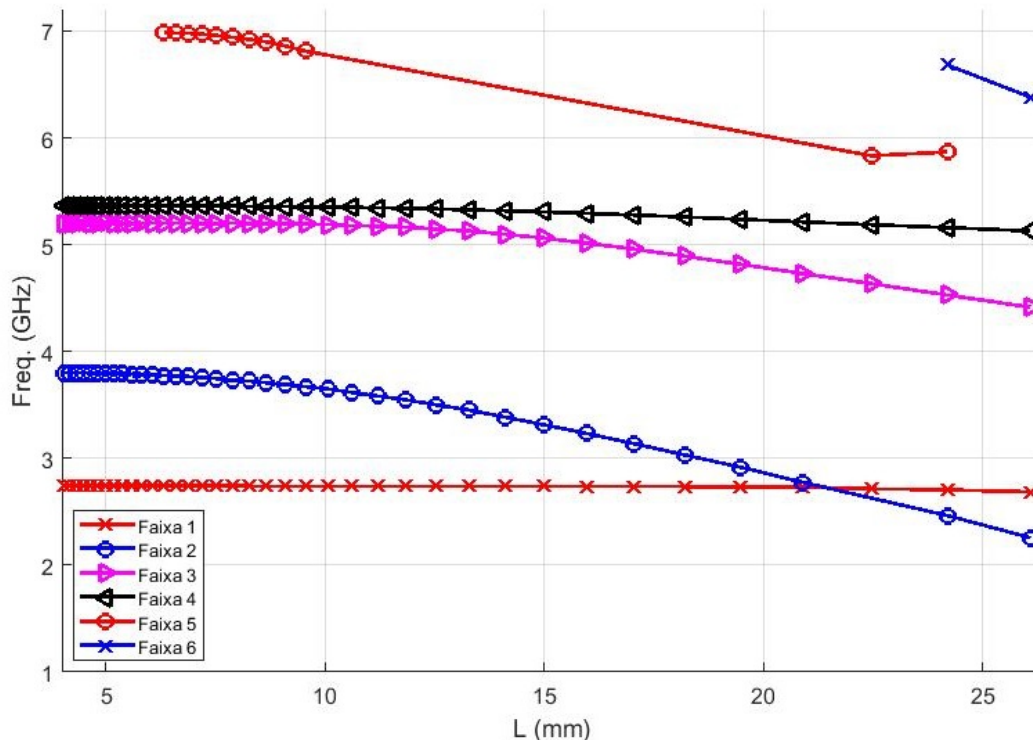
A Faixa 3 de frequências de ressonância tende a se manter constante até um ângulo

de abertura da fenda, $2\pi/\theta_f$, igual a 0,8267 radianos. Após esse valor, os valores de frequências de ressonância sofrem redução com o aumento dos tamanhos das fendas. Entretanto, essa redução é menor que para a Faixa 2. Por fim, a quarta faixa apresenta pouca redução dos valores de frequências de ressonância com os aumentos dos tamanhos das fendas. A variação é de 3,85% para os parâmetros usados.

Outras faixas de frequências aparecem nas análises, mas não apresentam indicações consideráveis que permitam associar as fendas dentro dos limites de simulações utilizados. Por fim, fica evidente que as antenas *patch* nefroide com fendas tendem a apresentar, naturalmente, resposta com quatro bandas de frequências.

A Figura 5.112 apresenta a análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* nefroide em função dos comprimentos das fendas catacústicas da circunferência interna gerada pelas cúspides (nefroide). Os dados da Tabela 5.4 são apresentados no gráfico, em que é possível observar as análises descritas acima.

Figura 5.112: Análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* nefroide em função dos comprimentos das fendas catacústicas da circunferência interna gerada pelas cúspides (nefroide).



5.3 Antenas *Patch* Circular com Fendas Catacústicas

As antenas *patch* circular apresentam resposta, predominante, em banda dupla, com tendência baixa de gerar frequências de ressonâncias indesejadas. No entanto, apresenta maior dificuldade de sintonizar as frequências de ressonâncias. Em que ocorre variação

das duas frequências com alteração do tamanho da fenda. Em contrapartida, apresenta a vantagem de ter tamanho reduzido quando comparado aos cardioides e às nefroides.

5.3.1 Parâmetros de Projetos para Antenas *Patch* Circular

Como as antenas *patch* circular apresentam uma limitação maior para a sintonia de frequências de ressonância, os projetos das antenas *patch* circular apresentam maiores variações de parâmetros. Adequações semelhantes às que foram realizadas nas antenas *patch* cardioide com fendas, ajustes dos tamanhos do raio da circunferência, A , e consequentemente, a comprimento ($H_{ele.irr}$) e a largura ($W_{ele.irr}$) do elemento irradiante é igual a $2A$.

Para o transformador de quarto de onda, são definidos duas variáveis. A primeira delas é W_{qwt} que representa a largura e a segunda é L_{qwt} , representando o comprimento da estrutura do transformador.

A fenda apresenta três variáveis associadas. A primeira delas é o ângulo de abertura da fenda, $2\pi/\theta_f$; a segunda é o comprimento da fenda, representado por $L_{fenda.car}$; e a terceira é w_f , que é a diferença entre a circunferência base de raio A e uma segunda circunferência tangencial a essa, com o raio $A - w_f$.

A Tabela 5.5 apresenta os valores dos parâmetros geométricos utilizados nos projetos de antenas *patch* circular.

Tabela 5.5: Parâmetros geométricos para projetos de antenas *patch* circular.

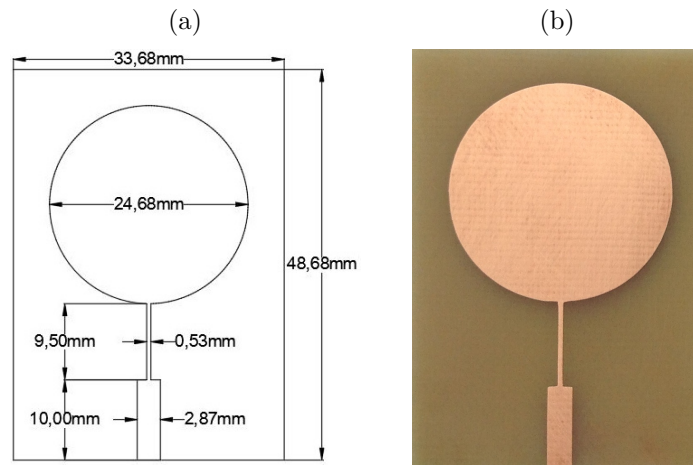
Antena circular	A (mm)	$L_{fenda.car}$ (mm)	$2\pi/\theta_f$ (rad)	L_{qwt} (mm)	W_{qwt} (mm)	w_f (mm)	$H_{ele.irr}$ (mm)	$W_{ele.irr}$ (mm)
Projeto 9	12,340	0,000	0,000	9,500	0,525	0,600	24,68	24,68
Projeto 10	11,646	30,256	2,094	8,150	0,460	0,600	23,29	23,29
Projeto 11	19,500	0,000	0,000	15,250	0,750	0,600	38,99	38,99
Projeto 12	15,500	64,693	3,696	12,250	0,625	0,600	30,98	30,98

5.3.2 Projeto 9: Antena *Patch* Circular sem Fenda para 3,309 GHz e 5,459 GHz

A antena *patch* circular sem fenda para o Projeto 9 tem o objetivo de obter a banda de WLAN 5GHz e com o auxílio da fenda obter bandas de operações de frequências inferiores. O raio do elemento irradiante A é 12,34 mm, enquanto que o transformador de quarto de onda apresenta comprimento, L_{qwt} , igual a 9,5 mm e largura, W_{qwt} , de 0,525 mm.

A Figura 5.113a apresenta o desenho do leiaute da antena do Projeto 9 desenhado. E a Figura 5.113b ilustra a antena fabricada, a qual foi realizada a medição em laboratório.

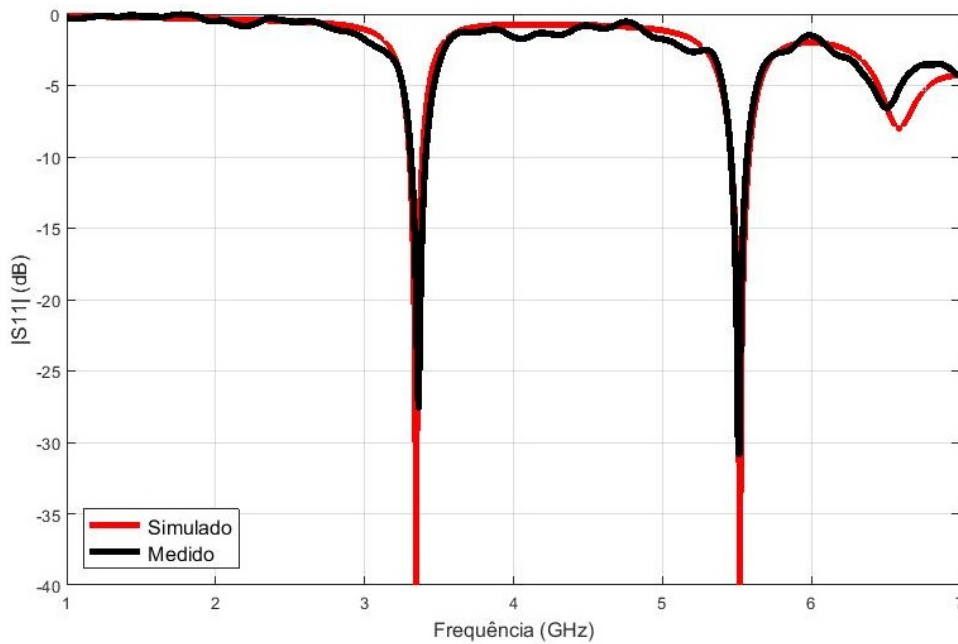
Figura 5.113: Antena *patch* circular sem fenda projetada para a banda de WLAN 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.114 apresenta a comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular sem fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 GHz e 5 GHz do Projeto 9. A medição em laboratório confirma a simulação, quando é realizada a comparação entre as duas curvas.

Figura 5.114: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular sem fenda projetada para as bandas de frequências de WMAN 3,5 GHz e WLAN 5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

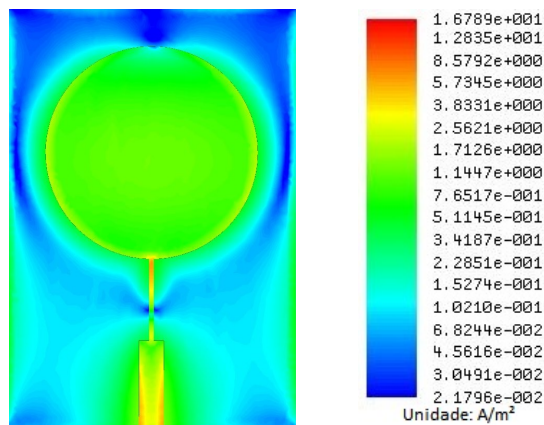
Como esperado duas bandas de frequências foram obtidas na medição em laboratório. A primeira delas ocupa a banda de 3,318 a 3,408 GHz, com uma largura de banda de 90

MHz e ressonância em 3,363 GHz. Entretanto, esta faixa não pertence ao WMAN 3,5 GHz, cuja variação é de 3,4 a 3,6 GHz.

Enquanto que a segunda faixa ocupa a banda de WLAN 5 GHz. A frequência mínima é de 5,463 GHz e a máxima é de 5,568 GHz, com uma largura de banda de 105 MHz. A ressonância ocorre na frequência de 5,515 GHz.

A Figura 5.115 apresenta a distribuição de densidade de corrente do Projeto 9 simulada para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz. O elemento irradiante apresenta redução na densidade de corrente na parte mais alta.

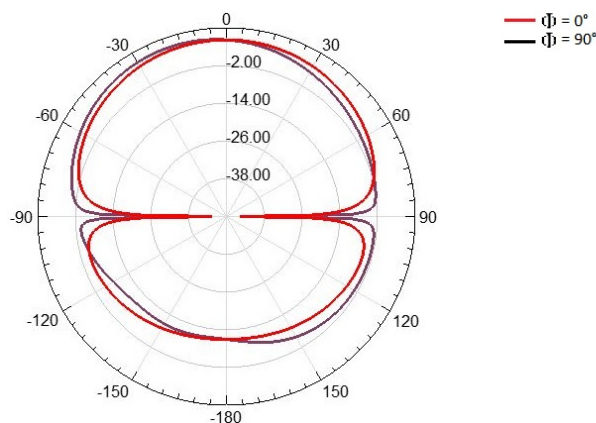
Figura 5.115: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz do Projeto 9.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 9 simulado para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz é apresentado na Figura 5.116. É formado apenas um lóbulo frontal e um posterior, sem a presença de secundários.

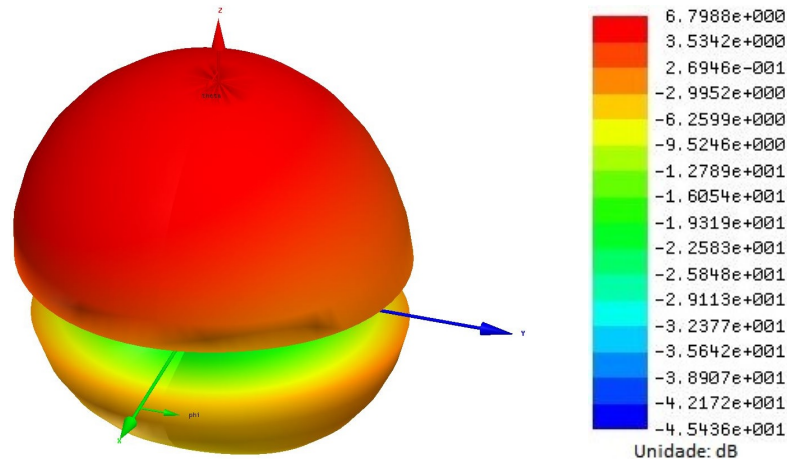
Figura 5.116: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz do Projeto 9.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.117 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 9 simulado para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz. É possível observar os lóbulos principais frontal e nas costas da antena. O ganho máximo da antena é de 6,80 dB.

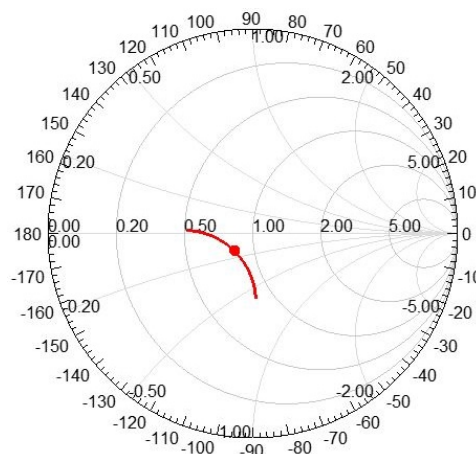
Figura 5.117: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,309 GHz do Projeto 9.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.118 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3 GHz do Projeto 9 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 3,309 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,8474 - j0,1970$.

Figura 5.118: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3 GHz do Projeto 9 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 3,309 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,8474 - j0,1970$.

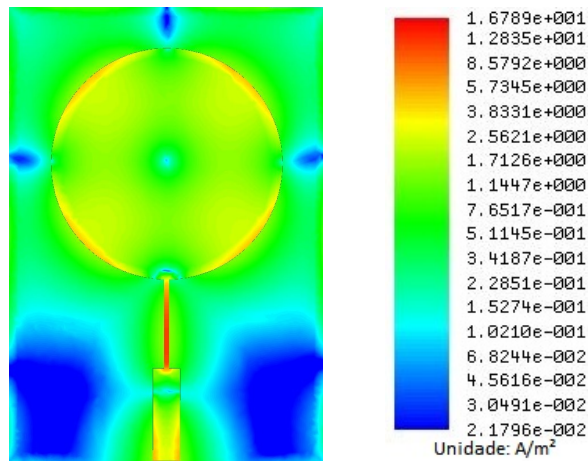


Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.119 ilustra a distribuição de densidade de corrente do Projeto 9 simulada para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz. O centro da antena

apresenta valores mínimos de densidade de corrente que aumentam em direção às bordas do elemento irradiante.

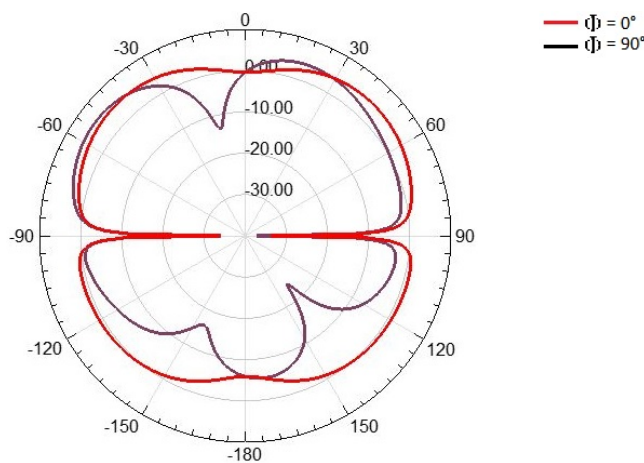
Figura 5.119: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz do Projeto 9.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 9 simulado para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz é ilustrado na Figura 5.120. Devido ao ponto de mínimo na densidade de corrente no centro do elemento irradiante, o diagrama de irradiação da antena apresenta múltiplos lóbulos irregulares, porém simétricos bilateralmente.

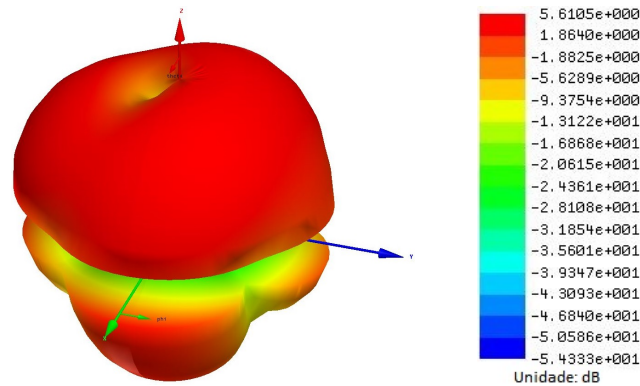
Figura 5.120: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz do Projeto 9.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.121 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 9 simulado para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz. A irradiação é simétrica bilateralmente com o valor de ganho máximo igual a 5,61 dB.

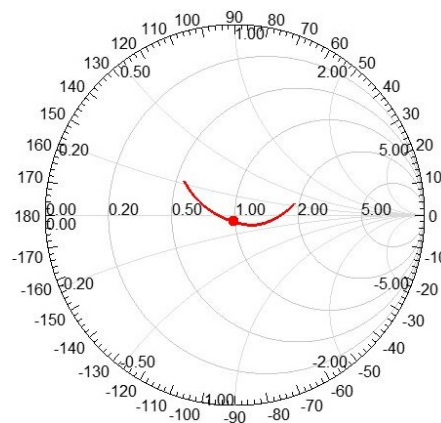
Figura 5.121: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz do Projeto 9.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.122 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 9 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 5,459 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9731 - j0,0678$.

Figura 5.122: Carta de Smith do Projeto 9 simulada pelo ANSYS Designer® para a antena *patch* circular sem fenda para a frequência 5,459 GHz e impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9731 - j0,0678$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

5.3.3 Projeto 10: Antena *Patch* Circular com Fenda para 3,432 GHz e 5,680 GHz

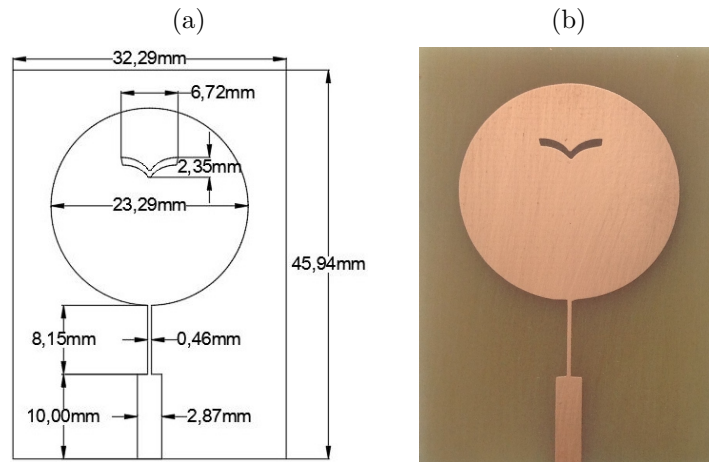
Partindo do banco de dados do Projeto 9, a antena *patch* circular com fenda do Projeto 10 tem como objetivo apresentar uma antena *patch* circular para a banda de WLAN 5 GHz e usar a fenda para sintonizar a banda de WMAN 3,5 GHz.

O elemento irradiante tem o raio, A , igual a 11,646 mm. Além de apresentar uma fenda catacústica de comprimento, $L_{fenda.car}$, igual a 30,256 mm, gerado por um ângulo de abertura, $2\pi/\theta_f$, de 2,094 radianos. Por fim, o transformador de quarto de onda

apresenta o comprimento, L_{qwt} , igual a 8,15 mm e a largura, W_{qwt} , com o valor de 0,46 mm.

A Figura 5.123(a) apresenta a antena *patch* circular com fenda para as bandas de 3,5 e 5 GHz, cujo leiaute desenhado. Enquanto que a Figura 5.123(b) ilustra a antena fabricada.

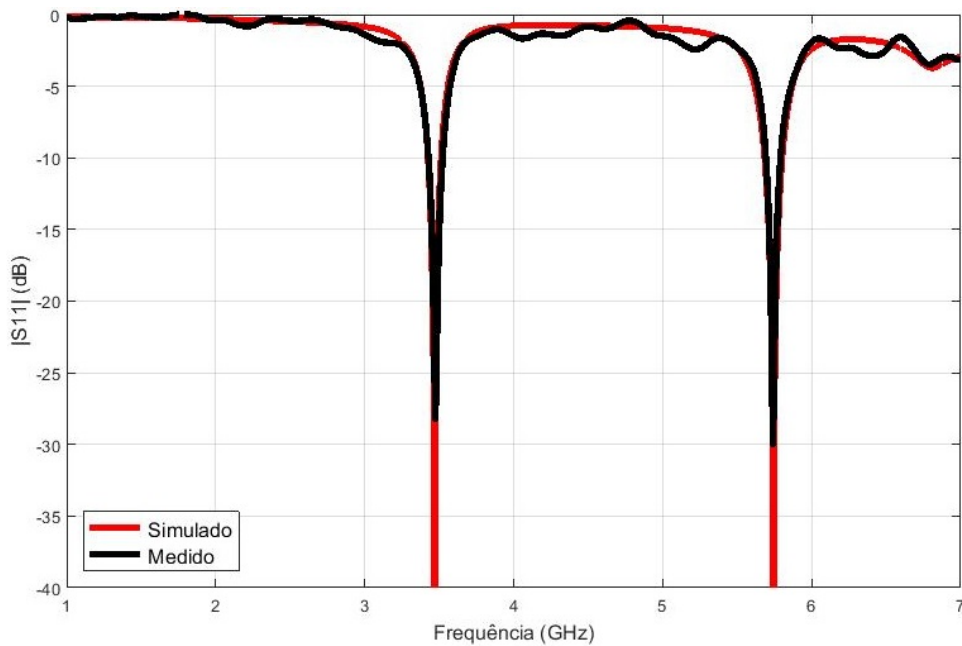
Figura 5.123: Antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de 3,5 GHz e 5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.124 apresenta a comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 GHz e 5 GHz.

Figura 5.124: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de frequências de 3,5 GHz e 5 GHz.



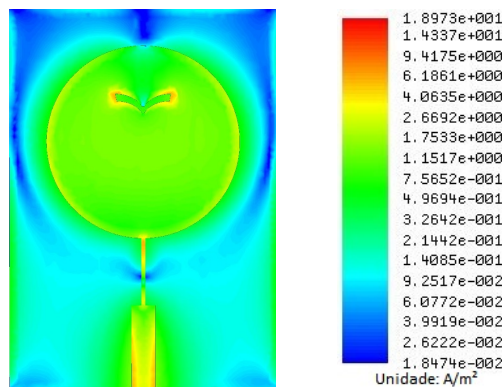
Fonte: Autoria própria, 2020.

É observável que a antena fabricada apresenta a mesma resposta da antena simulada, além de apresentar valores abaixo de -25 dB para valores de módulo de coeficiente de reflexão, $|S_{11}|$, para as duas frequências de ressonância.

A medição em laboratório apresenta duas bandas de interesse. A primeira banda é de WMAN 3,5 GHz tem a largura de 90 MHz, com a frequência mínima de 3,430 GHz e a máxima de 3,520 GHz. A frequência de ressonância é em 3,475 GHz. E para a banda de WLAN 5 GHz, a frequência de ressonância é de 5,740 GHz. A largura de banda é de 90 MHz, variando de 5,695 a 5,785 GHz.

A Figura 5.125 ilustra a distribuição de densidade de corrente do Projeto 10 simulada para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz.

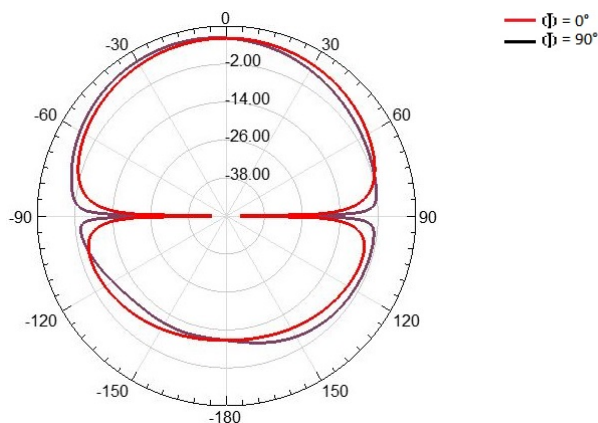
Figura 5.125: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz do Projeto 10.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz é apresentado na Figura 5.126.

Figura 5.126: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz do Projeto 10.

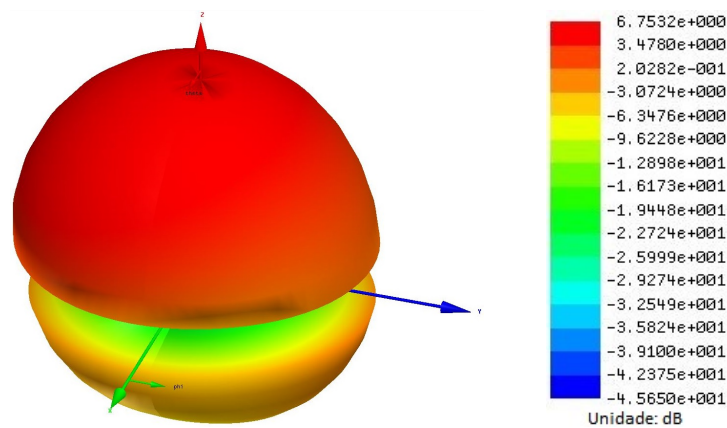


Fonte: Autoria própria, 2020.

É visível apenas um lóbulo frontal e um nas costas da antena sem a presença de lóbulos secundários.

A Figura 5.127 ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz, em que apresenta um ganho máximo de 6,75 dB.

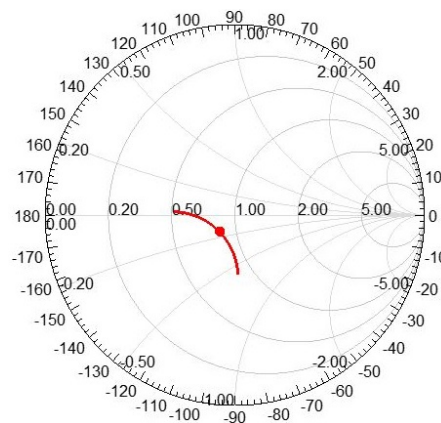
Figura 5.127: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,432 GHz do Projeto 10.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.128 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 3,432 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,8260 - j0,1259$.

Figura 5.128: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 3,432 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,8260 - j0,1259$.

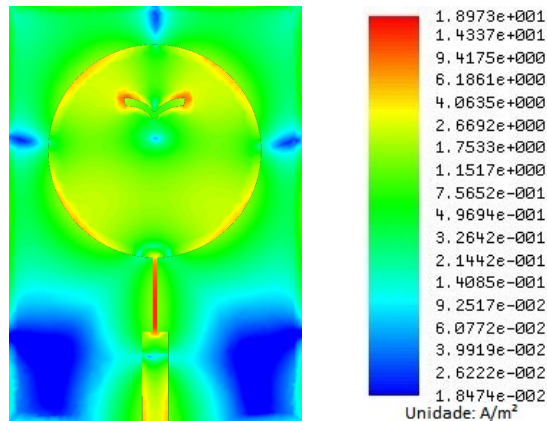


Fonte: Autoria própria, 2020.

Na Figura 5.129 é apresentado a distribuição de densidade de corrente do Projeto 10 simulada para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz. Os

valores mínimos de densidade de corrente no elemento irradiante estão localizados nos eixos horizontais e verticais. Enquanto que os maiores valores de densidades de corrente são encontradas nas proximidades das bordas e da fenda.

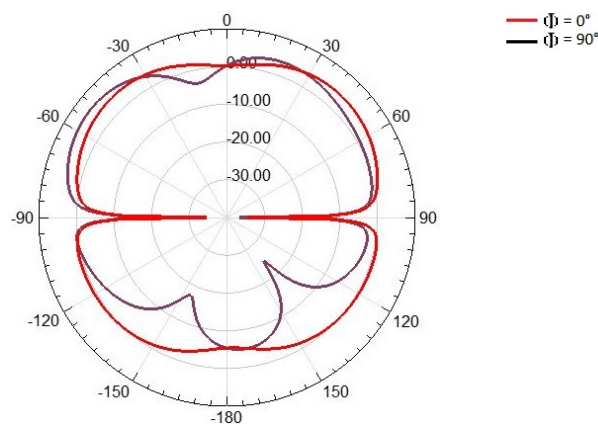
Figura 5.129: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz do Projeto 10.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz é apresentado na Figura 5.130. Como esperado pela distribuição de densidade de corrente da Figura 5.129, forma-se um lóbulo frontal irregular e múltiplos lóbulos posteriores.

Figura 5.130: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz do Projeto 10.

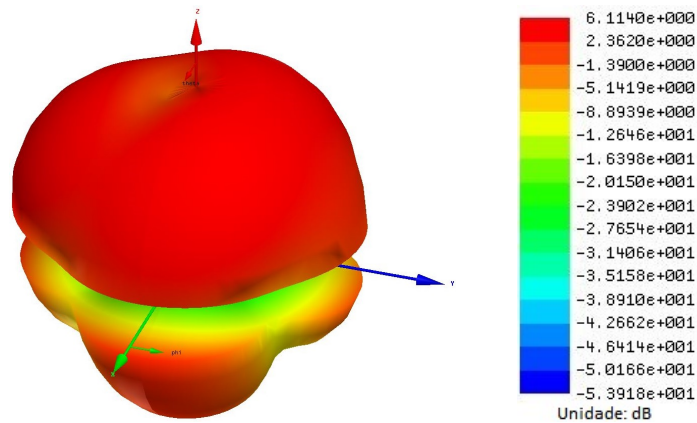


Fonte: Autoria própria, 2020.

E na Figura 5.131 é apresentado o diagrama de irradiação 3D do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz. É possível observar os quatro lóbulos irradiando para as laterais da antena, para cima e para baixo, com o

maior valor de ganho igual a 6,11 dB. Além de que o centro dos lóbulos é local de valor mínimo de irradiação.

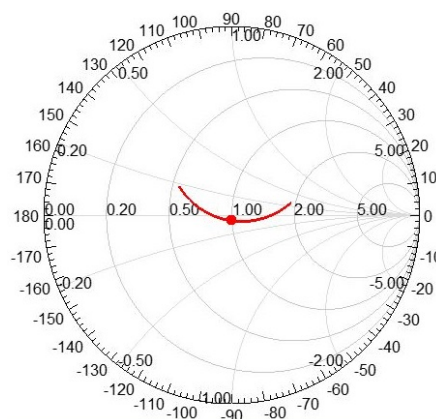
Figura 5.131: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 5,680 GHz do Projeto 10.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.132 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 5,680 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 1,0147 - j0,0739$.

Figura 5.132: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 5 GHz do Projeto 10 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 5,680 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 1,0147 - j0,0739$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

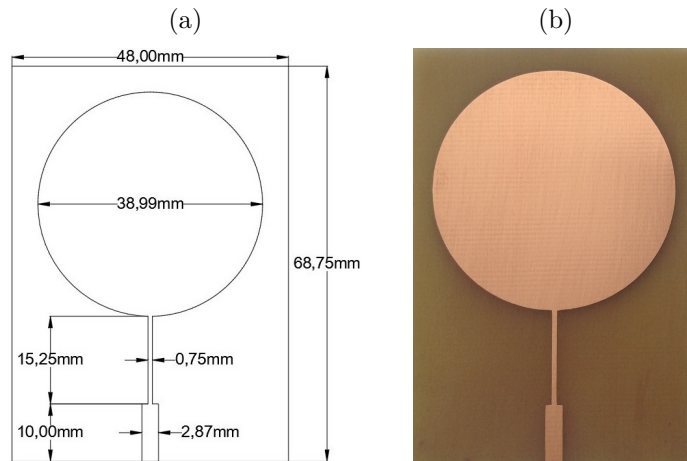
5.3.4 Projeto 11: Antena *Patch* Circular sem Fenda para 2,116 GHz e 3,502 GHz

A antena *patch* circular sem fenda do Projeto 11 tem o objetivo de sintonizar na banda de WMAN 3,5 GHz. O raio do elemento irradiante, A , tem o valor de 12,34 mm.

O transformador de quarto de onda apresenta o comprimento, L_{qwt} , igual a 15,25 mm e a largura, W_{qwt} , com o valor de 0,625 mm.

A Figura 5.133(a) apresenta antena *patch* circular sem fenda projetada para a banda de WMAN 3,5 GHz com o leiaute desenhado. Enquanto que a Figura 5.133(b) ilustra a antena fabricada, a qual foi submetida à medição em laboratório.

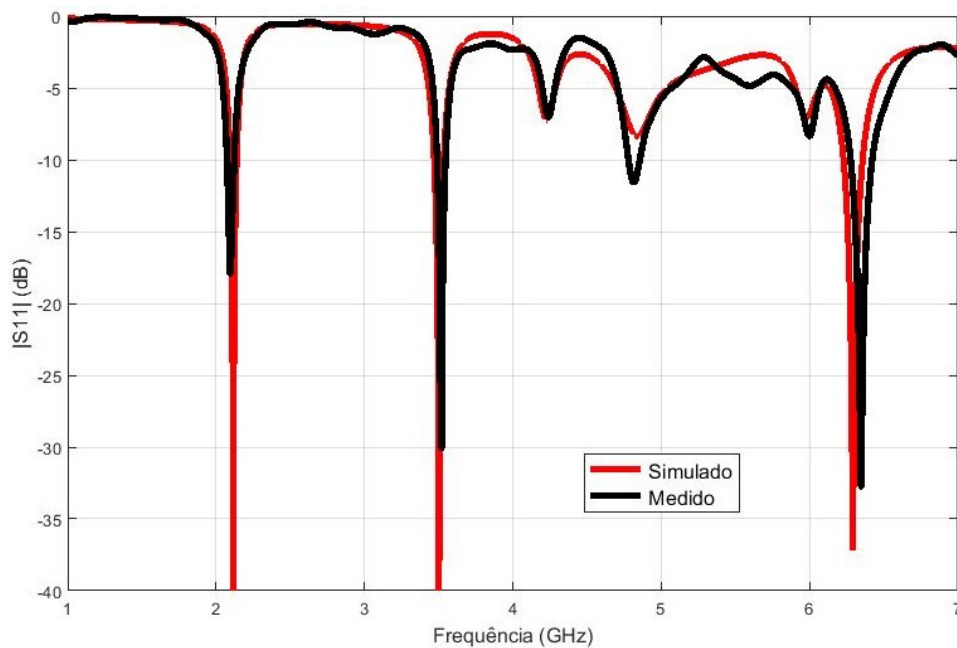
Figura 5.133: Antena *patch* circular sem fenda projetada para a banda de WMAN 3,5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular sem fenda projetada para as bandas de 2 GHz e 3,5 GHz é apresentado na Figura 5.134.

Figura 5.134: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular sem fenda projetada para as bandas de frequências de 2 GHz e WMAN 3,5 GHz.



Fonte: Autoria própria, 2020.

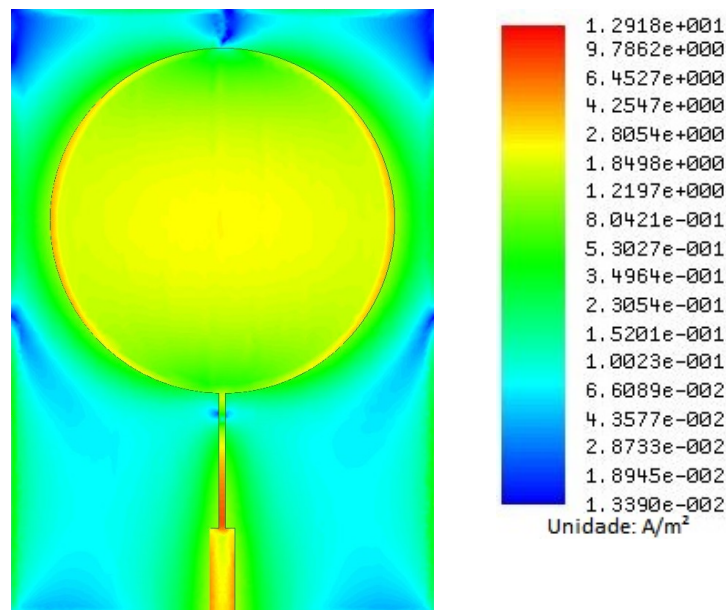
Destaca-se três frequências de ressonância na medição em laboratório. A primeira é a banda de 2 GHz, que apresenta a largura de banda de 38 MHz, com a frequência mínima de 2,080 GHz e a máxima de 2,118 GHz, com a frequência de ressonância em 2,095 GHz.

A segunda banda medida é a de WMAN 3,5 GHz. A frequência de ressonância é de 3,520 GHz, com a largura de banda de 53 MHz, com a frequência mínima de 3,490 GHz e a máxima de 3,543 GHz.

A banda de 4,780 a 4,855 GHz com ressonância em 4,818, não será analisada por aparecer apenas na medição. Por fim, a terceira banda é de 6,280 a 6,415 GHz, apresentando uma largura de banda de 135 MHz. A frequência de ressonância é em 6,348 GHz.

A Figura 5.135 apresenta a distribuição de densidade de corrente do Projeto 11 simulada para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz. A densidade de corrente reduz a medida que se afasta do centro em direção às bordas superior e inferior do elemento irradiante.

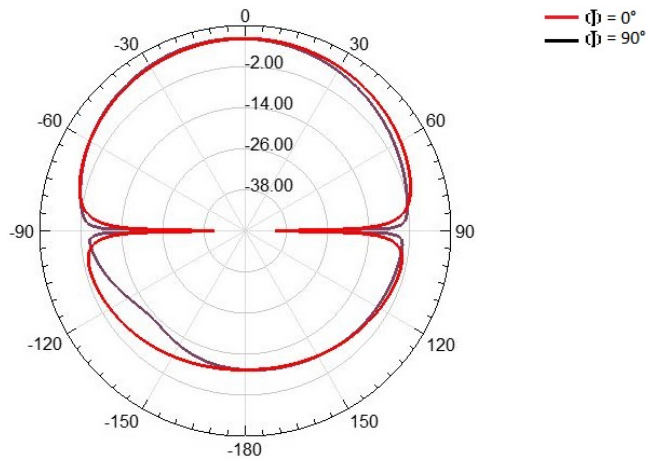
Figura 5.135: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz do Projeto 11.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz é apresentado na Figura 5.136. Apenas um lóbulo frontal com simetria bilateralmente é irradiado.

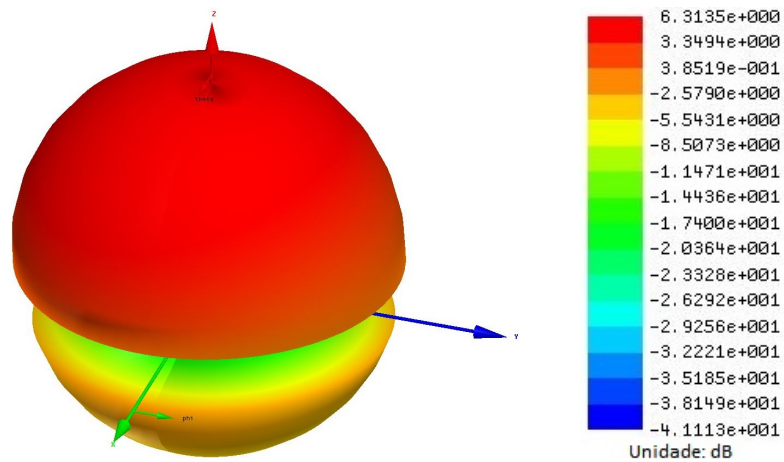
Figura 5.136: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz do Projeto 11.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.137a ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz. O valor de ganho máximo é de 6,31 dB.

Figura 5.137: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 2,116 GHz do Projeto 11.

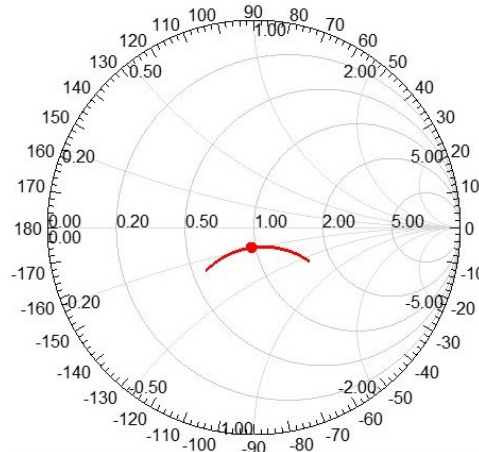


Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.138 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 2,116 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9469 - j0,1888$.

Figura 5.138: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 2 GHz do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 2,116 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω,

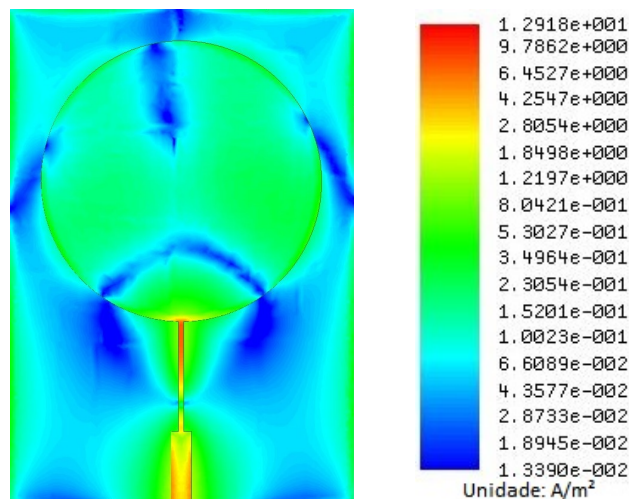
$$Z = 0,9469 - j0,1888.$$



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 11 simulada para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz é ilustrada na Figura 5.139. Os maiores valores de densidades de correntes estão presente na entrada do elemento irradiante e reduz em direção à parte superior e laterais, com faixas de valores mínimos.

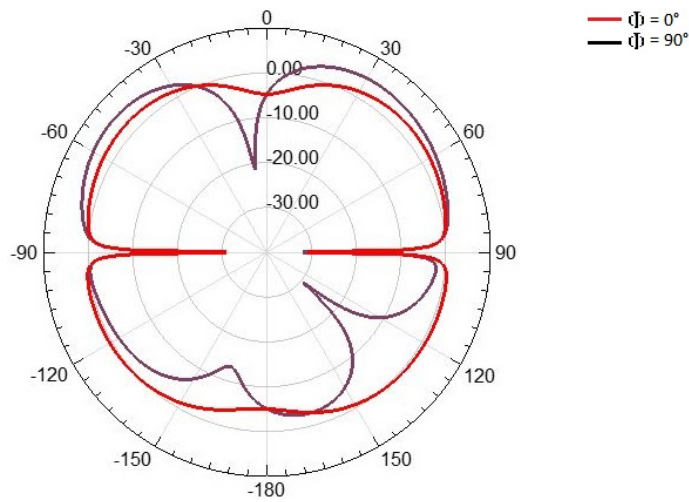
Figura 5.139: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz do Projeto 11.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.140 ilustra o diagrama de irradiação 2D do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz. É possível visualizar a formação de múltiplos lóbulos, com o centro do lóbulo frontal apresentando um valor de mínimo de irradiação.

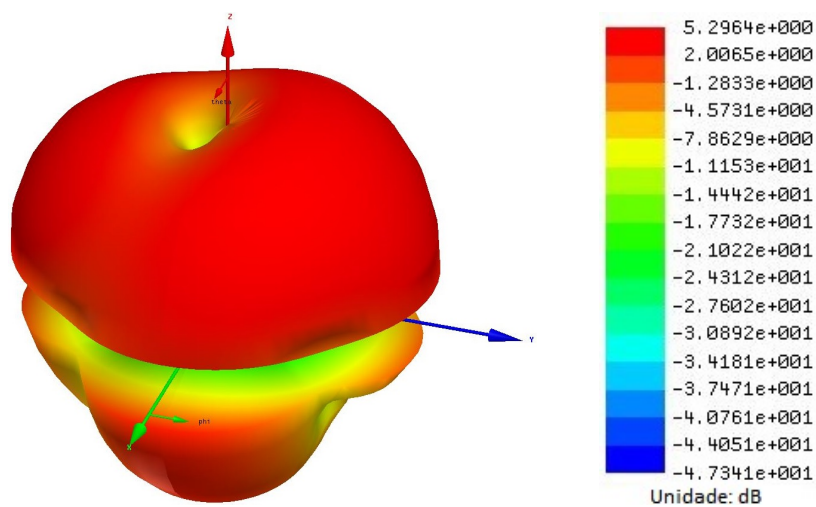
Figura 5.140: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz do Projeto 11.



Fonte: Aatoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 3D do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz é apresentado na Figura 5.141. Entre os lóbulos, próximo ao centro da irradiação está localizado o ponto de mínimo de irradiação. Enquanto que o máximo de irradiação aponta para a parte frontal inferior da antena, com o valor de 5,30 dB.

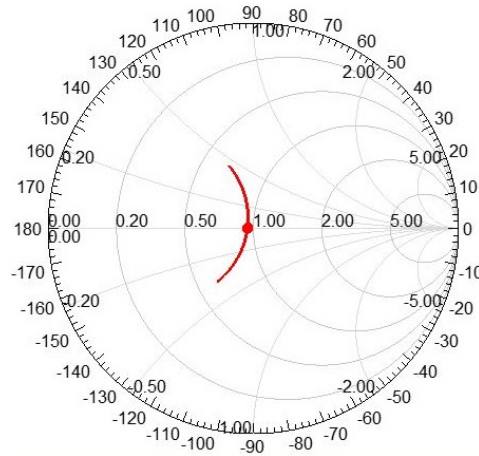
Figura 5.141: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular sem fenda na frequência de 3,502 GHz do Projeto 11.



Fonte: Aatoria própria, 2020.

A Figura 5.142 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 3,502 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9235 - j0,0616$.

Figura 5.142: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 11 simulado para a antena *patch* circular sem fenda, cuja a frequência de 3,502 GHz apresenta impedância normalizada para 50 Ω, $Z = 0,9235 - j0,0616$.



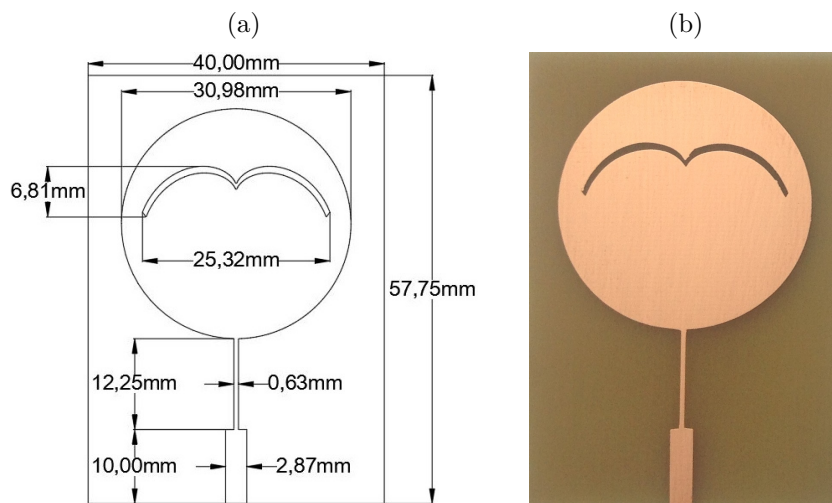
Fonte: Autoria própria, 2020.

5.3.5 Projeto 12: Antena *Patch* Circular com Fenda para 1,790 GHz e 3,590 GHz

A antena *patch* circular com fenda do Projeto 12 visa sintonizar as bandas de telefonia celular 1800 MHz e WMAN 3,5 GHz.

A Figura 5.143(a) apresenta o leiaute desenhado para a antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de 1800 MHz e 3,5 GHz. Enquanto que a Figura 5.143(b) apresenta a antena fabricada.

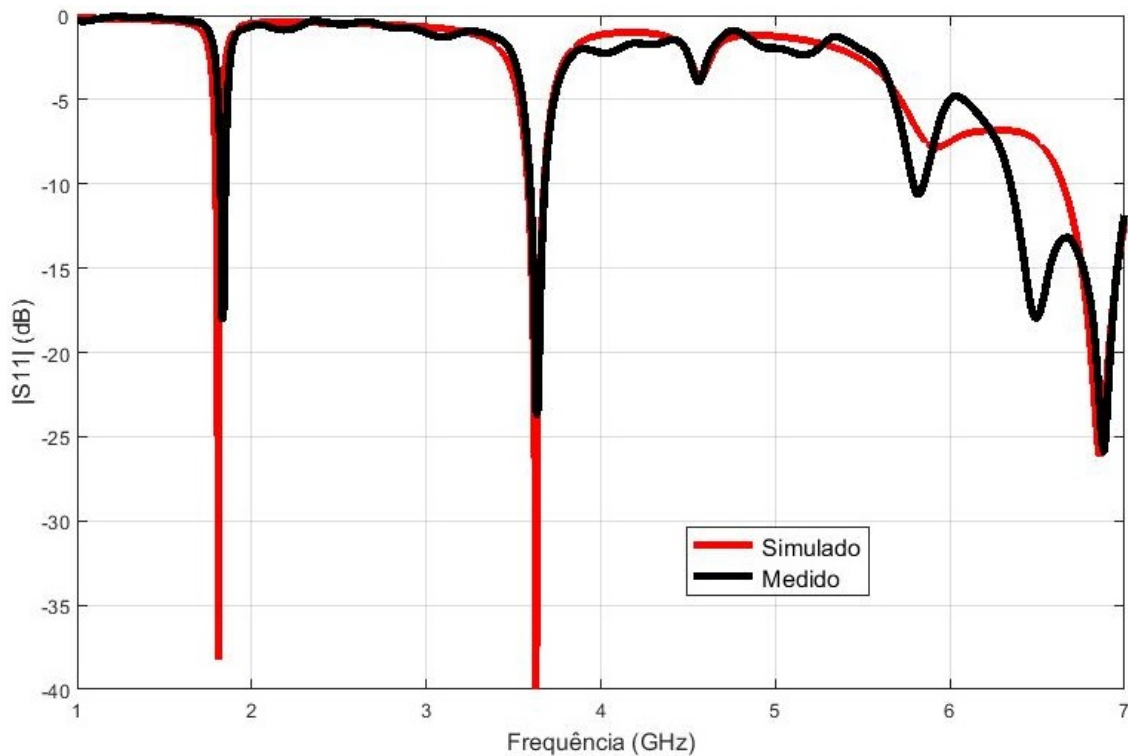
Figura 5.143: Antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de 1800 MHz e 3,5 GHz: (a) Leiaute desenhado; (b) imagem da antena fabricada.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular com fenda as bandas de frequências de 1800 MHz e 3,5 GHz do Projeto 12 é apresentada nos gráficos da Figura 5.144. Até a frequência de 5 GHz, a resposta da antena medida é semelhante ao da simulada. Entretanto, a partir de 5 GHz, há a presença de duas grandes oscilações seguindo a tendência de reduzir o módulo de coeficiente de reflexão, $|S_{11}|$, e sintoniza a frequência de ressonância em 6,880 GHz.

Figura 5.144: Comparação entre os resultados simulado e medido para a antena *patch* circular com fenda projetada para as bandas de frequências de 1800 MHz e 3,5 GHz do Projeto 12.



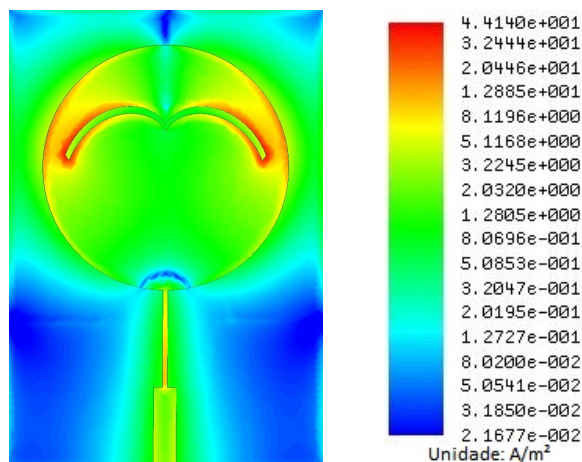
Fonte: Autoria própria, 2020.

Com a medição em laboratório foi constatado que a primeira banda de interesse é a de telefonia móvel 1800 MHz, com a frequência de ressonância de 1833 MHz. A largura de banda é estreita, com 23 MHz, variando de 1825 a 1848 MHz. A segunda banda é a de WMAN 3,5 GHz, com ressonância em 3,633 GHz. A largura de banda medida é de 83 MHz, variando de 3,595 a 3,678 GHz.

A banda de 6 GHz não será analisada neste trabalho devido aos limites estabelecidos. A banda tem a frequência mínima medida de 6,355 GHz e a máxima está do limite de simulação, com a frequência de ressonância em 6,880 GHz.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 12 simulada para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz é apresentada na Figura 5.145. Os maiores valores de densidade de corrente no elemento irradiante são encontrados nas bordas da fenda e nas laterais superiores.

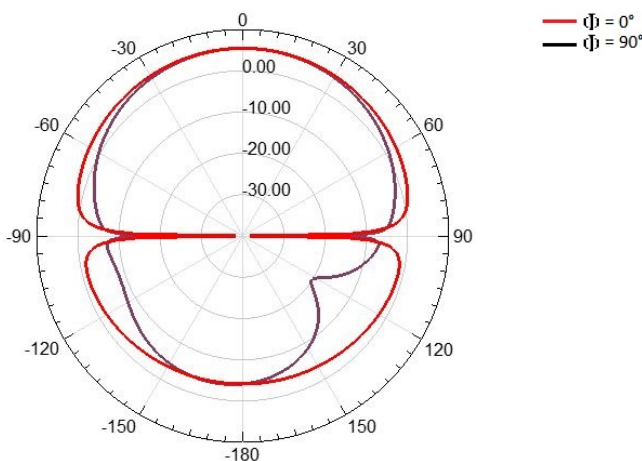
Figura 5.145: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz do Projeto 12.



Fonte: Autoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 12 simulado para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz é apresentado na 5.146. É observado apenas um lóbulo frontal regular e com simetria bilateral e tendo seus valores de máximo apontando para a frente da antena.

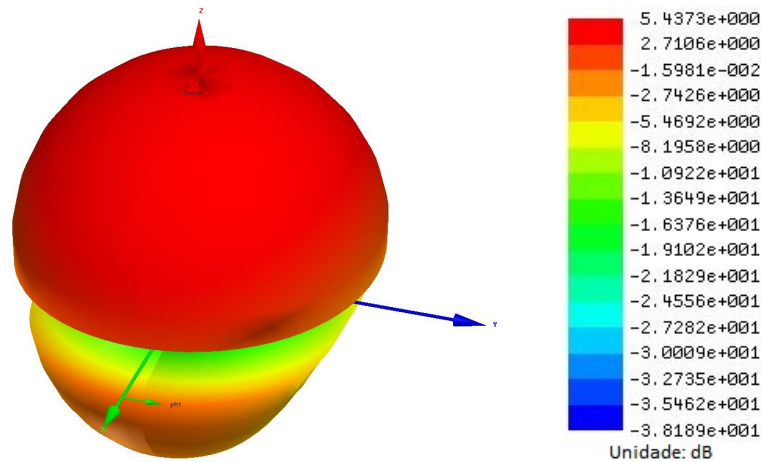
Figura 5.146: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz do Projeto 12.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.147 apresenta o diagrama de irradiação 3D do Projeto 12 simulado para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz. O ganho máximo é igual a de 5,48 dB.

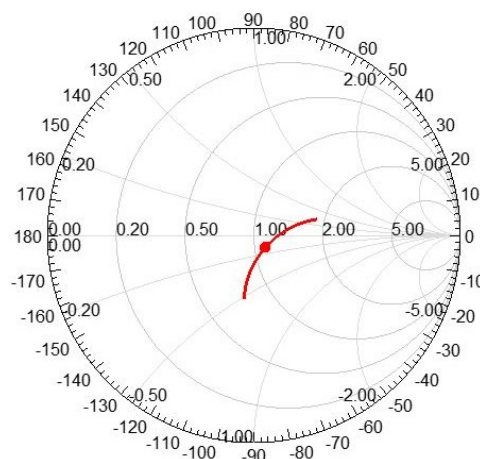
Figura 5.147: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 1,790 GHz do Projeto 12.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.148 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 12 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 1,790 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0887 - j0,1518$.

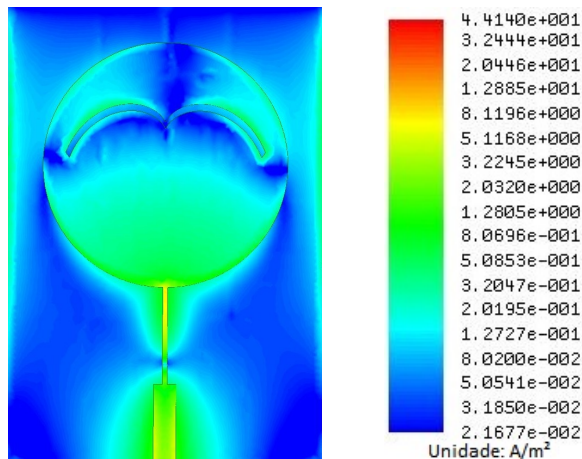
Figura 5.148: Gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 1800 MHz do Projeto 12 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 1,790 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 1,0887 - j0,1518$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A distribuição de densidade de corrente do Projeto 12 simulada para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz é ilustrada na Figura 5.149. Os maiores valores de densidade de corrente no elemento irradiante estão localizados nas bordas da fenda e na parte inferior.

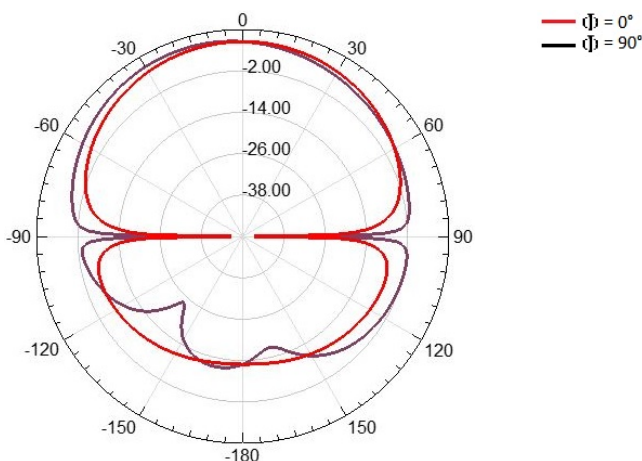
Figura 5.149: Resultado de simulação para distribuição de densidade de corrente para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz do Projeto 12.



Fonte: Aatoria própria, 2020.

O diagrama de irradiação 2D do Projeto 12 simulado para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz é apresentado na Figura 5.150.

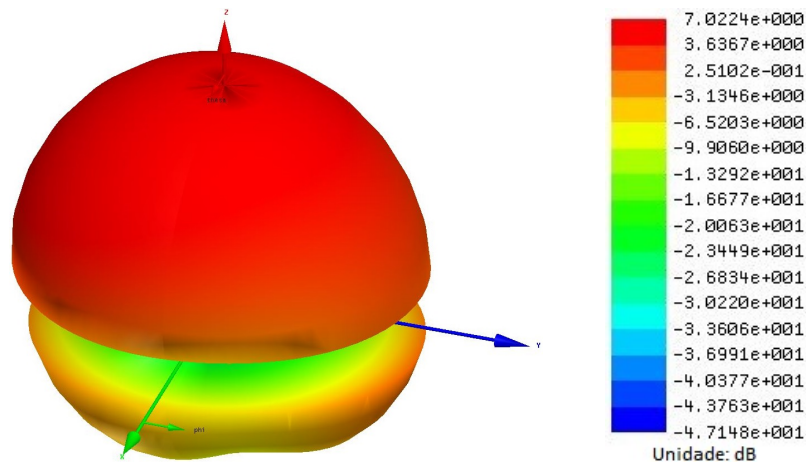
Figura 5.150: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 2D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz do Projeto 12.



Fonte: Aatoria própria, 2020.

A Figura 5.151a ilustra o diagrama de irradiação 3D do Projeto 12 simulado para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz, irradiando com o ganho máximo de 7,02 dB.

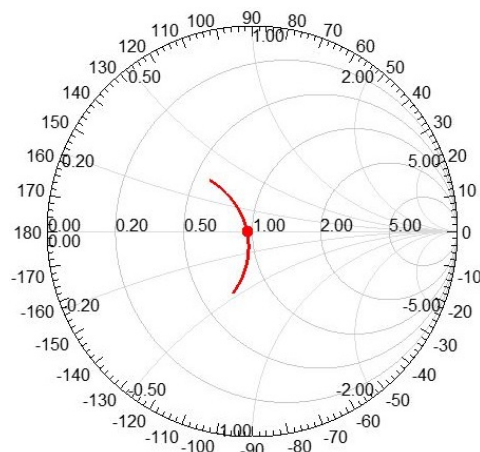
Figura 5.151: Resultado simulado para o diagrama de irradiação 3D para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz do Projeto 12.



Fonte: Autoria própria, 2020.

A Figura 5.148 apresenta o gráfico da impedância sobre a carta de Smith na banda de 3,5 GHz do Projeto 12 simulado para a antena *patch* circular com fenda, cuja a frequência de 3,590 GHz apresenta impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9086 - j0,0498$.

Figura 5.152: Carta de Smith do Projeto 12 simulada pelo ANSYS Designer® para a antena *patch* circular com fenda na frequência de 3,590 GHz e impedância normalizada para 50Ω , $Z = 0,9086 - j0,0498$.



Fonte: Autoria própria, 2020.

5.3.6 Análise Paramétrica da Antenas *Patch* Circular com Fendas Catacústicas

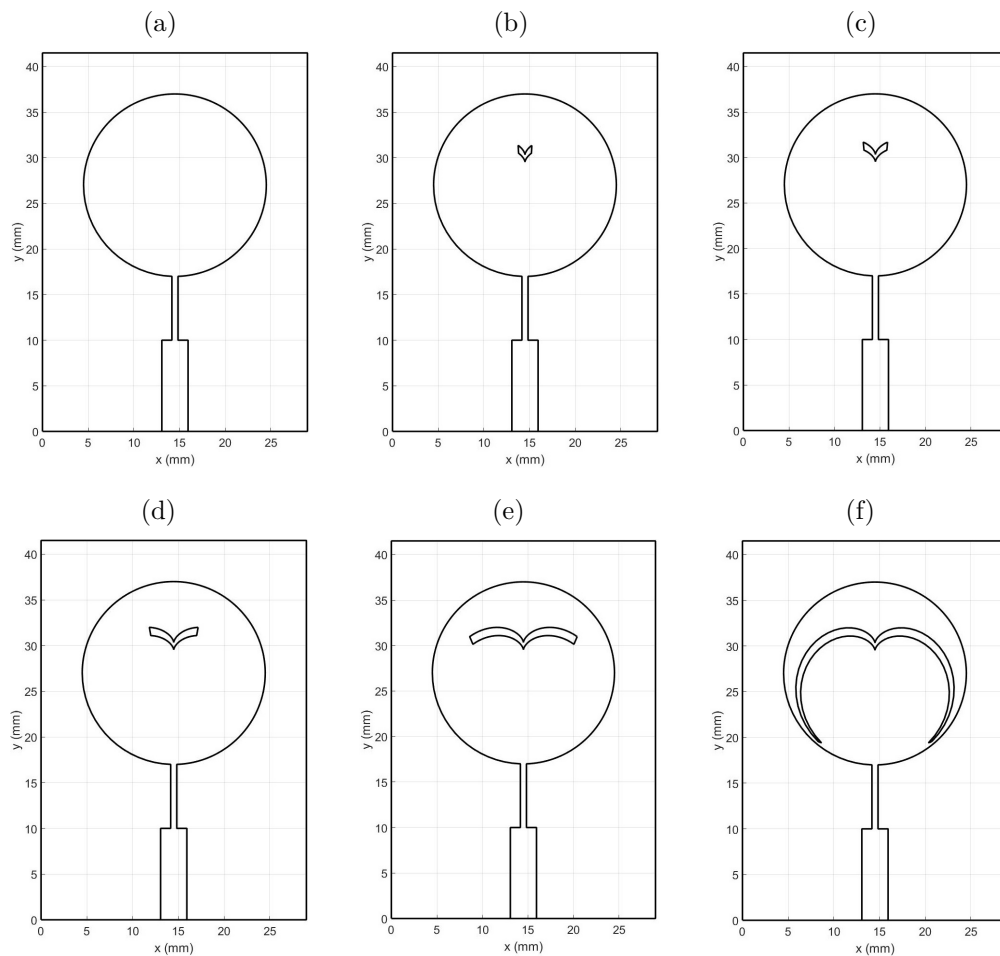
Para a avaliação dos resultados, considera-se um ponto a cada 1 MHz com método de interpolação. Os valores de $2\pi/\theta_f$ estão entre 1,26 e 5,24 radianos ($5,0 \geq \theta_f \geq 1,2$) e da mesma forma que nas antenas cardioides, quanto menor a fenda, maior o valor de θ_f .

5.3.6.1 Análise Paramétrica de Antenas *Patch* Circular para $A = 10$ mm

Para os resultados, é considerado que $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,67$ mm, $L_{qwt} = 7$ mm e $w_f = 0,6$ mm. São antenas com respostas mais estáveis, apresentando menor número de frequências de ressonâncias e frequências com tendências de ressonâncias. Três frequências de ressonância são percebidas dentro do intervalo de simulação com predominância de resposta em banda dupla, como apresentado na Figura 5.154 e na Tabela 5.6.

A Figura 5.153 apresenta a comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* circular desenhadas com auxílio do MATLAB® para $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,67$ mm, $L_{qwt} = 7$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica.

Figura 5.153: Comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* circular desenhadas com auxílio do MATLAB® para $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,67$ mm, $L_{qwt} = 7$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para $2\pi/\theta_f$ igual a: (a) 0,000 rad; (b) 1,257 rad; (c) 1,551 rad; (d) 2,027 rad; (e) 2,922 rad; (f) 5,236 rad.



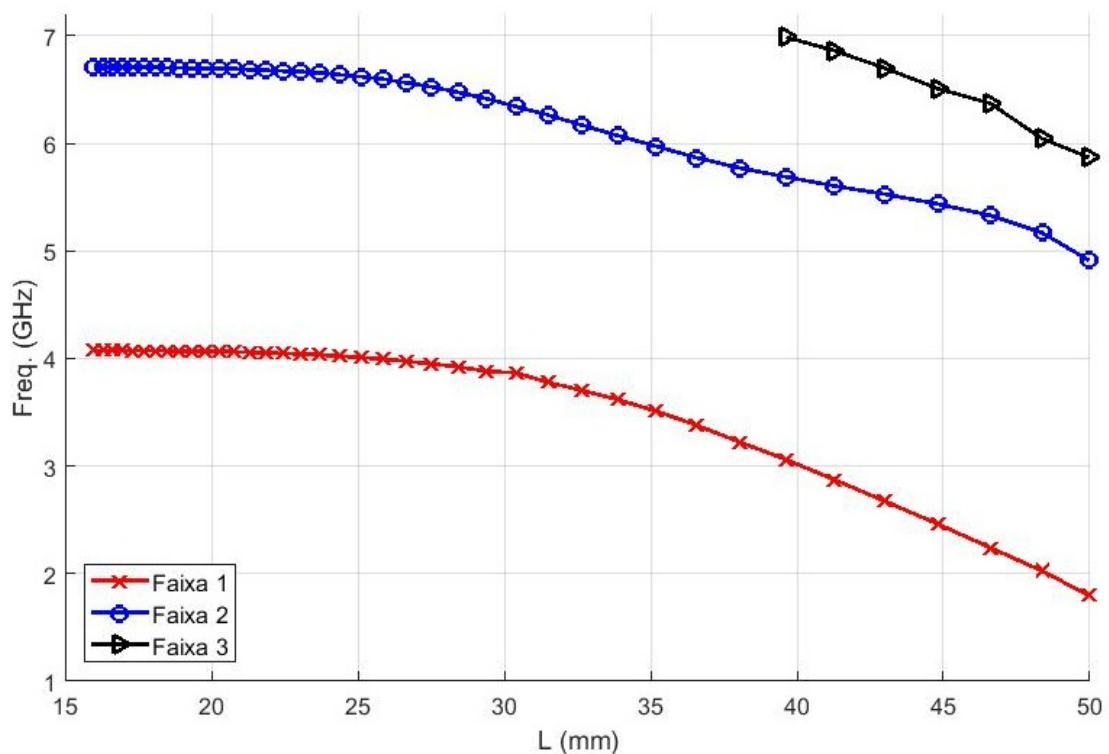
Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020¹⁷.

¹⁷ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de leiautes para comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* circular para $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,67$ mm, $L_{qwt} = 7$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Para a frequência inferior, uma fenda equivalente a um $2\pi/\theta_f$ de 5,24 radianos apresenta 44,05% da frequência de ressonância da antena sem *slot* e com 4,8, apresenta 99,90%. Enquanto a frequência superior, apresenta 73,21% e 99,93% da frequência superior com ausência da fenda, respectivamente para $\theta_f = 1,2$ e para $\theta_f = 4,8$. Sabendo que as frequências de ressonância, considerando banda dupla, da antena sem fenda são 4,079 e 6,711 GHz, respectivamente. As frequências de 5,868 a 6,986 GHz aparecem quando os valores dos ângulo de abertura da fenda $2\pi/\theta_f$ entre 3,49 e 5,24 radianos ($1,8 \geq \theta_f \geq 1,2$).

A Figura 5.154 ilustra a análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* circular de dimensões menores em função dos comprimentos das fendas catacústicas (cardioide) para os valores de $A = 10$ mm, $W_{qwt} = 0,670$ mm, $L_{qwt} = 7$ mm e $w_f = 0,6$ mm.

Figura 5.154: Análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* circular de dimensões menores em função dos comprimentos das fendas catacústicas (cardioide).



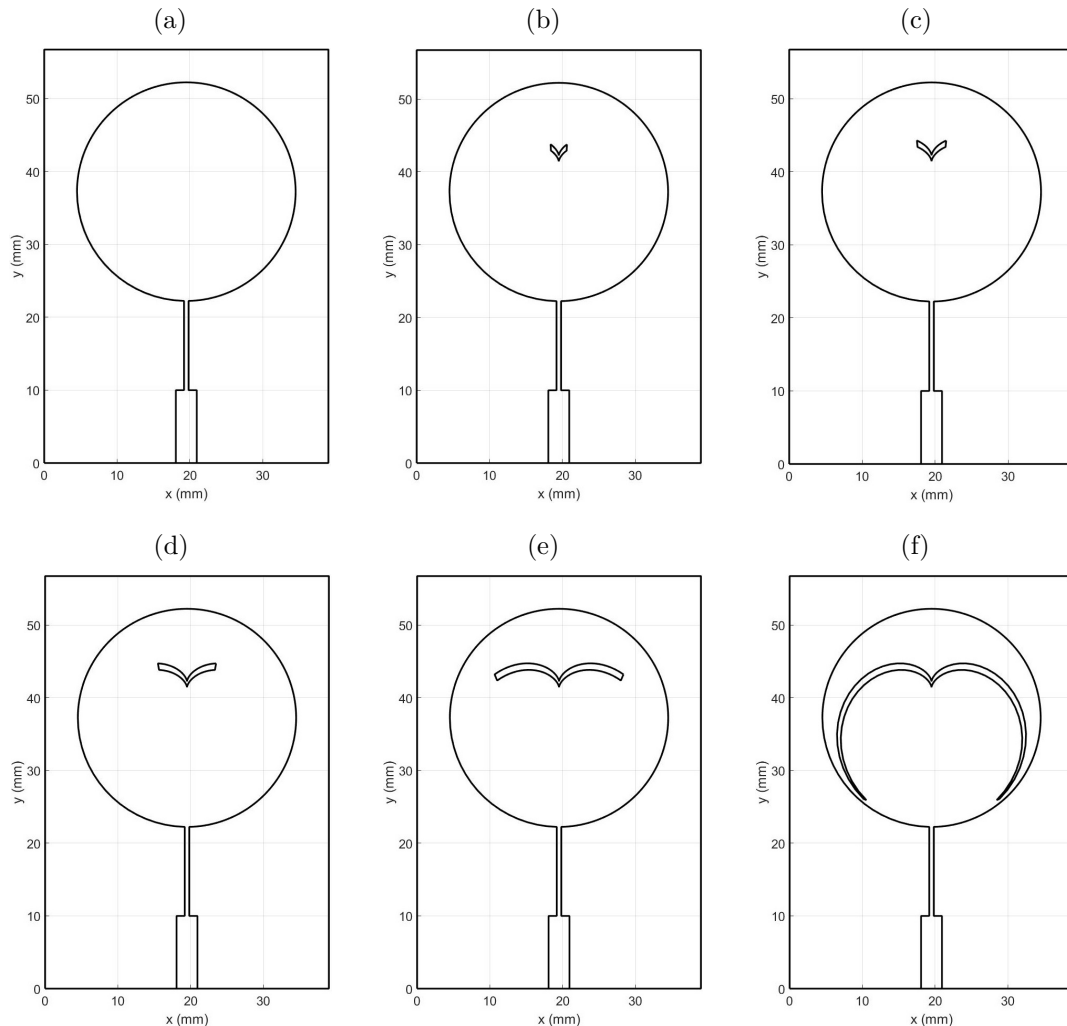
Fonte: Autoria própria, 2020.

5.3.6.2 Análise Paramétrica de Antenas *Patch* Circular para $A = 15,5$ mm

Mais uma análise foi realizada. Os novos valores paramétricos das antenas *patch* circular são $A = 15,5$ mm, $W_{qwt} = 0,625$ mm, $L_{qwt} = 12,25$ mm e $w_f = 0,6$ mm.

A Figura 5.155 ilustra a comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* circular desenhadas com auxílio do MATLAB[®] para $A = 15,5$ mm, $W_{qwt} = 0,625$ mm, $L_{qwt} = 12,25$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para diferentes valores de θ_f .

Figura 5.155: Comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* circular desenhadas com auxílio do MATLAB® para $A = 15,5$ mm, $W_{qwt} = 0,625$ mm, $L_{qwt} = 12,25$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica para $2\pi/\theta_f$ igual a: (a) 0,000 rad; (b) 1,257 rad; (c) 1,551 rad; (d) 2,027 rad; (e) 2,922 rad; (f) 5,236 rad.

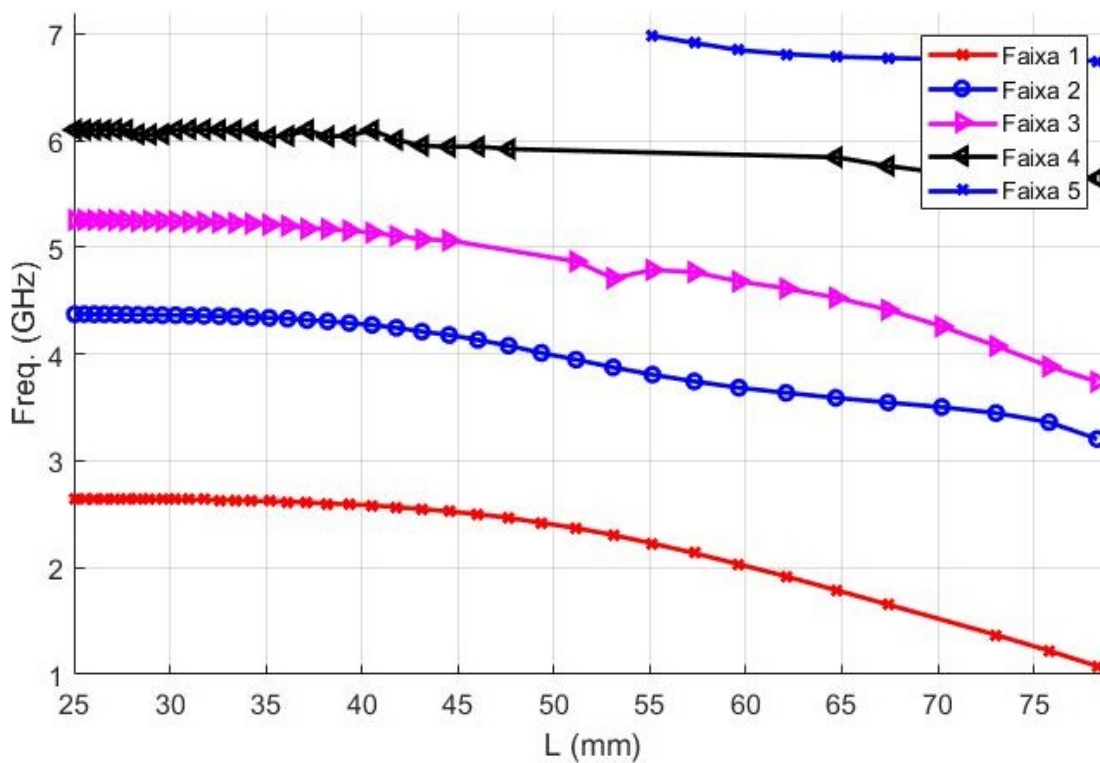


Fonte: Paulo Henrique da Fonseca Silva, 2020¹⁸

A Figura 5.156 apresenta a análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* circular de dimensões maiores em função dos comprimentos das fendas catacásticas (cardioide) para os valores de $A = 15,5$ mm, $W_{qwt} = 0,625$ mm, $L_{qwt} = 12,25$ mm e $w_f = 0,6$ mm.

¹⁸ O programa desenvolvido em MATLAB® para obtenção de leiautes para comparação dos tamanhos das fendas para as antenas *patch* circular para $A = 15,5$ mm, $W_{qwt} = 0,625$ mm, $L_{qwt} = 12,25$ mm e $w_f = 0,6$ mm utilizadas na análise paramétrica foi cedido para aplicação nesta Dissertação de Mestrado pelo professor orientador Paulo Henrique da Fonseca Silva.

Figura 5.156: Análise paramétrica das frequências de ressonância das antenas *patch* circular de dimensões maiores em função dos comprimentos das fendas catacásticas (cardioide).



Fonte: Autoria própria, 2020.

As antenas *patch* circular para $A = 15,5$ mm apresentam duas frequências de ressonância principais, predominância de resposta em banda dupla, como apresentado na Figura 5.156. Apesar de que duas novas faixas aparecem, essas frequências não são estáveis como as duas faixas inferiores, podendo ser corrigidos com o transformador de quarto de onda. Além de que, podem aparecer mais frequências de ressonância.

Quando o ângulo de abertura da fenda está entre 3,49 e 5,23 radianos ($1,8 \geq \theta_f \geq 1,2$), um conjunto de frequências de 5,868 a 6,986 GHz aparecem. Essa situação não é analisada nesta dissertação.

Para a frequência inferior, uma fenda equivalente a um $2\pi/\theta_f$ de 5,23 radianos tem 40,64% da frequência de ressonância da antena sem fenda e com 1,26 radianos apresenta 99,77%. Enquanto a frequência superior, apresenta 73,21% e 99,91% da frequência superior com ausência da fenda, respectivamente. Sabendo que as frequências de ressonância da antena sem fenda são 2,650 e 4,378 GHz.

5.3.6.3 Comparação entre Antenas *patch* Circular para $A = 10$ mm e para $A = 15,5$ mm

A Tabela 5.6 apresenta as relações das frequências em porcentagem para antenas *patch* circular para $A = 10$ mm e para $A = 15,5$ mm. Apenas as duas primeiras faixas de frequências são analisadas.

Tabela 5.6: Relações das frequências em porcentagem para antenas *patch* circular para $A = 10$ mm e para $A = 15,5$ mm.

θ_f	$2\pi/\theta_f$ (rad)	Antena Circular: A = 10 mm			Antena Circular: A = 15,5 mm		
		$L_{fen.men}$ (mm)	Faixa 1	Faixa 2	$L_{fen.mai}$ (mm)	Faixa 1	Faixa 2
$+\infty$	0,0	0,0000	100% 4,079 GHz	100% 6,711 GHz	0,0000	100% 2,650 GHz	100% 4,378 GHz
5,0	1,2566	15,9865	99,90%	99,99%	25,0510	99,77%	99,91%
4,8	1,3090	16,6291	99,90%	99,93%	26,0580	99,77%	99,89%
4,6	1,3659	17,3244	99,85%	99,94%	27,1476	99,77%	99,86%
4,4	1,4280	18,0789	99,83%	99,93%	28,3299	99,70%	99,77%
4,2	1,4960	18,9003	99,68%	99,84%	29,6170	99,62%	99,70%
4,0	1,5708	19,7975	99,66%	99,79%	31,0229	99,51%	99,61%
3,8	1,6535	20,7810	99,58%	99,72%	32,5641	99,36%	99,50%
3,6	1,7453	21,8635	99,34%	99,51%	34,2603	99,13%	99,25%
3,4	1,8480	23,0595	99,07%	99,31%	36,1345	98,75%	98,93%
3,2	1,9635	24,3869	98,60%	98,90%	38,2146	98,11%	98,38%
3,0	2,0944	25,8667	97,92%	98,29%	40,5330	97,47%	97,60%
2,8	2,2440	27,5238	96,84%	97,21%	43,1301	96,15%	95,96%
2,6	2,4166	29,3879	95,15%	95,60%	46,0511	94,34%	94,40%
2,4	2,6180	31,4933	92,60%	93,32%	49,3503	91,32%	91,62%
2,2	2,8560	33,8781	88,67%	90,46%	53,0874	86,98%	88,53%
2,0	3,1416	35,5810	82,81%	87,39%	57,3228	80,60%	85,52%
1,8	3,4907	39,6300	75,02%	84,74%	62,1007	72,38%	83,07%
1,6	3,9270	43,0147	65,51%	82,34%	67,4045	62,42%	81,02%
1,4	4,4880	46,6101	54,92%	79,41%	73,0385	51,66%	78,76%
1,2	5,2360	49,9706	44,05%	73,21%	78,3044	40,64%	73,21%

Fonte: Autoria própria, 2020.

A resposta da variação do tamanho da fenda para a antena menor e maior foram semelhantes, como apresentado para na Tabela 5.6. Para cada frequência de referência sem a presença da fenda, a maior diferença percentual para um mesmo valor de θ_f é inferior a 4% dentro dos limites analisados. As antenas *patch* circular são, predominantemente, banda dupla.

Capítulo 6

Conclusão

Esta dissertação aborda três formatos de antenas *patch*, cardioide, nefroide e circular, com suas respectivas fendas catacústicas. O efeito óptico da concentração de luz por reflexão, que dá origem as curvas catacústicas, foi observado para antenas *patch* por concentração de densidade de corrente nas bordas das fendas.

Todos os leiautes das antenas foram analisados com o uso do *software* ANSYS Designer[®]. Cada um dos formatos estudados tem características que podem ser aplicadas em telefonia móvel 1800 MHz, Wi-Fi 2,4 GHz, WiMAX 3,5 GHz e Wi-Fi 5 GHz. Além de apresentarem vantagens e desvantagens de acordo com a aplicação desejada.

As antenas *patch* cardioide tem a reposta, predominantemente, em banda dupla semelhante ao das antenas circulares. Como vantagem, a frequência de ressonância superior tende a se manter constante com a variação do tamanho da fenda. Enquanto que a frequência de ressonância inferior varia com o tamanho da fenda. O valor máximo para a banda inferior é limitado pela antena *patch* cardioide. Essa característica facilita a sintonia de frequências.

Como consequência das respostas das antenas *patch* cardioide com fendas catacústicas (nefroide), para gerar uma antena que sintonize um sistema de duas bandas, deve-se simular a antena sem fenda para obter os valores da banda superior que tende a manter-se fixa e sintonizar a frequência de ressonância máxima da banda inferior. Após isso, usa-se a fenda para fazer a sintonia da banda inferior na frequência de ressonância desejada.

Ao contrário das antenas *patch* cardioide, as antenas *patch* nefroide com fendas catacústicas apresentam múltiplas frequências de ressonância, sendo as quatro primeiras as mais estáveis. Isso dificulta a análise das respostas das antenas *patch* nefroide caso haja dados insuficientes. Além de que o ajuste de impedância tem um papel fundamental na sintonia das frequências juntamente com as fendas catacústicas das circunferências internas geradas pelas cúspides (nefroide). Além de que, outra desvantagem das antenas *patch* nefroide com fendas catacústicas (nefroides) é o tamanho do elemento irradiante.

As antenas *patch* circular com fenda catacústicas (cardioide) apresentam a vantagem de ter um tamanho menor quando comparado com as antenas *patch* cardioide e nefroide.

O ajuste de impedância é simples, pois a resposta em banda dupla é mantido. Entretanto, a sintonia de bandas específicas é mais complicado do que nas antenas *patch* cardioide e mais simples do que nas antenas *patch* nefroide. As duas frequências de ressonância se alteram com a alteração do tamanho da fenda cardioide, por isso, o transformador de quarto de onda sofre alterações conforme a variação do tamanho da fenda.

Outro ponto é que o diagrama de irradiação das antenas *patch* podem sofrer grandes

alterações com a presença das fendas catacáusticas. Esse efeito ocorre, principalmente, a partir da segunda faixa de frequências. Além de que, a alimentação por linha de microfita e transformador de quarto de onda não é única forma de alimentar esses formatos de antenas *patch*. Esse trabalho pode ser expandido usando outras formas de alimentar as antenas e fazer os casamentos de impedâncias, como exemplo, sonda coaxial.

Conclui-se que as estruturas, devidamente com suas fendas partindo das curvas catacáusticas apresentam como opção para sintonia de frequências. Esse fator facilita os projetos para aplicações para antenas multifunções. Podendo ser aplicado para tecnologias telefonia celular, Wi-Fi, WiMAX e comunicações em dispositivos portáteis. Além de que, o transformador de quarto de onda pode ser usado para sintonizar uma frequência ou um grupo de frequências sem alterar a estrutura do elemento irradiante. Essa característica é de grande ajuda para os projetistas, os quais podem ter seus trabalhos facilitados.

Referências

- [1] BALANIS, C. **Antenna Theory: Analysis and Design**. Wiley, 2012. ISBN 9781118585733. Disponível em: <www.wiley.com>.
- [2] LEE, K. F. et al. The Versatile U-Slot Patch Antenna. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 52, n. 1, p. 71–88, 2010.
- [3] ALI, M. et al. A Dual Band U-Slot Printed Antenna Array for LTE and WiMAX Applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 55, n. 12, p. 2879–2883, 2013.
- [4] VARMA, R.; GHOSH, J.; BHATTACHARYA, R. A compact dual frequency double U-slot rectangular microstrip patch antenna for WiFi/WiMAX. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 59, n. 9, p. 2174–2179, 2017.
- [5] MORSHED, K. M.; KARMOKAR, D. K.; ESSELLE, K. P. Low profile single-layer U-slot loaded shorted-patch antenna for wireless communications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 59, n. 9, p. 2224–2226, 2017.
- [6] ANATEL. **Resolução nº 454, de 11 de Dezembro de 2006**. 2006. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2006/89-resolucao-454>. Acesso em: 24 Mai. 2020.
- [7] KHANNA, V. K. Designing low power ad-hoc 802.11 wireless networks for voice and video applications. In: **TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference**. Hyderabad, Índia: IEEE, 2008. p. 1–6. ISSN 2159-3442.
- [8] FENG, Y. et al. IEEE 802.11 HCCA for tactile applications. In: **2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)**. Melbourne, VIC, Austrália: IEEE, 2017. p. 1–3. ISSN 2474-154X.
- [9] DESHMUKH, A.; RAY, K. P. Analysis of Broadband Variations of U-Slot Cut Rectangular Microstrip Antennas. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 57, n. 2, p. 181–193, Abr. 2015.
- [10] KHIDRE, A. et al. Wide Band Dual-Beam U-Slot Microstrip Antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 61, n. 3, p. 1415–1418, Mar. 2013.
- [11] SUN, H.; GUO, Y.; WANG, Z. 60-Ghz Circularly Polarized U-Slot Patch Antenna Array on LTCC. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 61, n. 1, p. 430–435, Jan. 2013.
- [12] FAKHARIAN, M.; REZAEI, P.; OROUJI, A. Reconfigurable Multiband Extended U-Slot Antenna with Switchable Polarization for Wireless Applications. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 57, n. 2, p. 194–202, Abr. 2015.
- [13] QIN, P. et al. Polarization Reconfigurable U-Slot Patch Antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 58, n. 10, p. 3383–3388, Out. 2010.

- [14] LIU, S. et al. Single-Layer Single-Patch Four-Band Asymmetrical U-Slot Patch Antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 62, n. 9, p. 4895–4899, Set. 2014.
- [15] ANATEL. **Resolução nº 647, de 9 de Fevereiro de 2015**. 2015. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2015/787-resolucao-647>. Acesso em: 24 Mai. 2020.
- [16] ANATEL. **Resolução nº 657, de 3 de Novembro de 2015**. 2015. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2015/787-resolucao-657>. Acesso em: 24 Mai. 2020.
- [17] ANATEL. **Resolução nº 703, de 1 de Novembro de 2018**. 2018. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2018/1178-resolucao-703>. Acesso em: 24 Mai. 2020.
- [18] ANATEL. **Resolução nº 672, de 16 de Dezembro de 2016**. 2016. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2016/918-resolucao-672>. Acesso em: 24 Mai. 2020.
- [19] ANATEL. **Resolução nº 640, de 11 de Julho de 2014**. 2014. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/785-resolucao-640>. Acesso em: 25 Mai. 2020.
- [20] DALMIA, S. et al. A compact single band 802.11 n front-end module for MIMO applications using multi-layer organic technology. In: **2008 IEEE Radio and Wireless Symposium**. Orlando, FL, Estados Unidos: IEEE, 2008. p. 863–866. ISSN 2164-2958.
- [21] TIAN, H.; YANG, W. Study on QoS of Multimedia Traffics in MAC Layer Based on 802.11. In: **2012 International Conference on Information Science and Applications**. Suwon, Coréia do Sul: IEEE, 2012. p. 1–6. ISSN 2162-9048.
- [22] ZHANG, C.; LEI, L.; ZHANG, T. Analyzing the cumulative interfering noise in multi-hop IEEE 802.11 networks. In: **2014 IEEE Computers, Communications and IT Applications Conference**. Beijing, China: IEEE, 2014. p. 133–136.
- [23] KIM, Y. et al. Fast handoff by multi-beacon listening in IEEE 802.11 WLAN networks. In: **2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)**. Milan, Itália: IEEE, 2017. p. 806–808. ISSN 2165-8536.
- [24] IEEE. IEEE Standard for Information Technology—Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. **IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)**, p. 1–3534, Dez. 2016.
- [25] IEEE. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY)

- Extension in the 2.4 GHz Band - Corrigendum 1. **IEEE Std 802.11b-1999/Cor 1-2001**, p. 1–24, Nov. 2001.
- [26] IEEE. IEEE Standard for Information Technology - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band. **IEEE Std 802.11g-2003 (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edn. (Reaff 2003) as Amended by IEEE Stds 802.11a-1999, 802.11b-1999, 802.11b-1999/Cor 1-2001, and 802.11d-2001)**, p. 1–104, Jun. 2003.
- [27] IEEE. IEEE Standard for Information Technology - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. **IEEE Std 802.11n -2009 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as Amended by IEEE Std 802.11k - 2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, and IEEE Std 802.11w-2009)**, p. 1–565, Out. 2009.
- [28] ANATEL. **Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017**. 2017. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>. Acesso em: 24 Mai. 2020.
- [29] ANATEL. **Resolução nº 705, de 21 de dezembro de 2018**. 2018. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2018/1220-resolucao-705>. Acesso em: 24 Mai. 2020.
- [30] IEEE. IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz Band. **IEEE Std 802.11a-1999**, p. 1–102, Dez. 1999.
- [31] MATTOS, G. M. **Rede de Acesso em Banda Larga utilizando Sistemas VSAT e WiFi**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Abril de 2006.
- [32] LIMA, L. dos S.; SOARES, L. F. G.; ENDLER, M. **WiMAX: Padrão IEEE 802.16 para Banda Larga Sem Fio**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Set. 2004. Acesso em: 1 Fev. 2020.
- [33] IEEE. IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. **IEEE Std 802.16-2017 (Revision of IEEE Std 802.16-2012)**, p. 1–2726, Mar. 2018.
- [34] GUAINELLA, E. et al. WiMAX technology support for applications in environmental monitoring, fire prevention and telemedicine. In: **2007 IEEE Mobile WiMAX Symposium**. Orlando, FL, Estados Unidos: IEEE, 2007. p. 125–131.
- [35] CLANCY, T. C.; BURNETTE, A.; AGRAWALA, A. MAXwell Lab: Building a WiMAX Forum Applications Laboratory. In: **2009 IEEE Mobile WiMAX Symposium**. Napa Valley, CA, Estados Unidos: IEEE, 2009. p. 152–156.

- [36] CHOW, B. et al. Radio-over-fiber distributed antenna system for wimax bullet train field trial. In: **2009 IEEE Mobile WiMAX Symposium**. Napa Valley, CA, Estados Unidos: IEEE, 2009. p. 98–101.
- [37] IEEE. IEEE Standard for WirelessMAN-Advanced Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. **IEEE Std 802.16.1-2012**, p. 1–1090, Set. 2012.
- [38] IEEE. IEEE Standard for WirelessMAN-Advanced Air Interface for Broadband Wireless Access Systems - Amendment 2: Higher Reliability Networks. **IEEE Std 802.16.1a-2013 (Amendment to IEEE Std 802.16.1-2012)**, p. 1–319, Jun. 2013.
- [39] IEEE. IEEE Standard for WirelessMAN-Advanced Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 1: Enhancements to Support Machine-to-Machine Applications. **IEEE Std 802.16.1b-2012 (Amendment to IEEE Std 802.16.1-2012)**, p. 1–126, Out. 2012.
- [40] IEEE. IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems. **IEEE Std 802.16.2-2004 (Revision of IEEE Std 802.16.2-2001)**, p. 1–166, Mar. 2004.
- [41] WEINSTEIN, L. A.; BECKMANN, P. Open resonators and open waveguides. **American Journal of Physics**, v. 38, p. 114–115, Jan 1970.
- [42] FERRÉOL, R. **CAUSTIC**. 2017. Disponível em: <www.mathcurve.com/courbes2d.gb/caustic/caustic.htm>. Acesso em: 25 Mai. 2020.
- [43] WEISSTEIN, E. W. **Cardioid**. Disponível em: <mathworld.wolfram.com/Cardioid.html>. Acesso em: 3 Mai. 2020.
- [44] WEISSTEIN, E. W. **Circle Catacaustic**. Disponível em: <mathworld.wolfram.com/CircleCatacaustic.html>. Acesso em: 3 Mai. 2020.
- [45] WEISSTEIN, E. W. **Nephroid**. Disponível em: <mathworld.wolfram.com/Nephroid.html>. Acesso em: 3 Mai. 2020.
- [46] JAKUS, S.; O’ROURKE, J. **From Pop-Up Cards to Coffee-Cup Caustics: The Knight’s Visor**. 2012. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1206.1312.pdf>>. Acesso em: 9 Jan. 2020.
- [47] WEISSTEIN, E. W. **Cardioid Catacaustic**. Disponível em: <mathworld.wolfram.com/CardioidCatacaustic.html>. Acesso em: 3 Mai. 2020.
- [48] STEWART, J. **Cálculo - Volume 2 - Tradução da 7ª edição norte-americana**. Estados Unidos: SBM, 2014. ISBN 9788522112593.