

Refletor de Bragg Impresso em 3D
para Aumentar o Ganho e a
Diretividade de Antenas de Ondas
Centimétricas e Milimétricas

JÉSSICA ABRANCHES PINTO RIBEIRO

DEZEMBRO / 2021



**REFLETOR DE BRAGG IMPRESSO
EM 3D PARA AUMENTAR O GANHO
E A DIRETIVIDADE DE ANTENAS
DE ONDAS CENTIMÉTRICAS E MI-
LIMÉTRICAS**

JÉSSICA ABRANCHES PINTO RIBEIRO

Dissertação apresentada ao Instituto Nacio-
nal de Telecomunicações, como parte dos re-
quisitos para obtenção do Título de Mestre
em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Ricardo
Mejía Salazar.

COORIENTADOR: Prof. Dr. Felipe Beltrán
Mejía.

Ribeiro, Jéssica Abranches Pinto

R484r

Refletor de Bragg impresso em 3D para aumentar o ganho e a diretividade de antenas de ondas centimétricas e milimétricas. / Jéssica Abranches Pinto Ribeiro. – Santa Rita do Sapucaí, 2021.

65 p.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Ricardo Mejía Salazar.

Co-orientador: Prof. Dr. Felipe Beltrán Mejía.

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia.

1. Antena WiFi 2. Diretividade 3. Ganho 4. Impressão em 3D. 5. Refletor de Bragg. 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Salazar, Jorge Ricardo Mejía. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 08 / 12 / 2021,
pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Jorge Ricardo Mejía-Salazar
INATEL

Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza
INATEL

Prof. Dr. Osvaldo Novais de Oliveira Jr
USP

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Camara Brito

*"A persistência é o menor caminho
do êxito"*

Charles Chaplin

*Aos meus pais, por sempre acreditarem em mim, apoiando com amor minhas
decisões.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me acompanhar e me fortalecer ao longo de toda minha trajetória, pela minha vida e por me presentear com as pessoas que amo.

Agradeço à minha família, aos meus pais Jessé e Stela pelo amor e apoio incondicional e às minhas irmãs Jecilene e Jenifer pela cumplicidade e amizade.

Agradeço à Karine pelo companheirismo, amor e incentivo em todos os momentos, nas conquistas e nas dificuldades. Muito obrigada.

Aos professores Dr. Felipe Beltrán Mejía e Dr. Jorge Ricardo Mejía-Salazar por terem confiado em mim como uma orientanda digna de seus ensinamentos e orientações. Sou grata por toda a ajuda e paciência.

Ao professor Dr. José Antônio Justino Ribeiro, sou grata pelos conselhos e pelo auxílio fundamental, oferecendo com dedicação parte de seus conhecimentos e experiências.

Aos meus amigos e colegas de mestrado, especialmente ao Evandro Vilas Boas que sempre me apoiou e aconselhou durante essa jornada.

Agradeço, ao professor Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior por ter autorizado o acesso ao laboratório WOCA para a realização dos experimentos. Agradeço, também, ao Hugo Filgueiras, pelas discussões e auxílio nas medições.

Agradeço ao INATEL e a todos os seus colaboradores, pela dedicação em oferecer o excelente ambiente e qualidade no ensino. Em especial à Gisele Moreira dos Santos, por toda atenção e paciência, sempre disposta a ajudar.

Jéssica Abranches Pinto Ribeiro

Sumário

Sumário	x
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Publicações	xix
Resumo	xxi
Abstract	xxiii
1 Introdução	1
1.1 Contribuições e estrutura da dissertação	2
2 Antenas com refletores	5
2.1 Camadas transparentes como refletor	6
2.1.1 Reflexão e Refração na interface entre meios	6
2.1.2 Refletores de Bragg	9
3 Refletor de Bragg aplicado à antena do roteador IEEE 802.11	11
3.1 Propagação da onda eletromagnética entre camadas dielétricas	12
3.2 Geometria da estrutura de Bragg para o máximo de reflexão	15
4 Análise numérica do sistema irradiante proposto	19
4.1 Comportamento do coeficiente de reflexão	19
4.2 Diretividade do diagrama de irradiação	19
5 Caracterização experimental	25
5.1 Metodologia de testes	25
5.2 Resultados experimentais	27
6 Conclusões e propostas para novas pesquisas	31

Referências Bibliográficas**33**

Lista de Figuras

1.1	(a) Forma de uma antena dipolo de meia onda. (b) Diagrama de irradiação tridimensional em 5,7 GHz de um dipolo de meia onda e sua escala de ganho em dBi.	3
1.2	Cobertura em uma residência da emissão de um dipolo com polarização vertical, com o ponto de acesso instalado próximo à parede, distribuindo parte do sinal fora da região de interesse.	4
2.1	Incidência oblíqua em uma interface dielétrica onde $n_1 < n_2$	7
2.2	Dois meios dielétricos separados por uma superfície plana. O campo incidente do meio 1 é parcialmente refletido e parcialmente transmitido para o meio 2.	8
2.3	Difração de raio-x por uma sucessão de planos atômicos paralelos separados por d , para um dado ângulo de incidência θ	9
3.1	QWS composto por 3 espelhos de espessura d , construídos com dois diferentes materiais dielétricos em pares de camadas alternadas de espessuras d_1 e d_2 , para estudo da ação de multicamadas dielétricas periódicas quando há incidência normal de uma onda eletromagnética.	12
3.2	Módulo do coeficiente de reflexão total na face de entrada da estrutura dielétrica $ R_f $ para estudar seu comportamento refletivo.	14
3.3	Configuração do QWS desenvolvido na forma de cilindros com abertura central em duas diferentes vistas: (a) tridimensional e (b) frontal.	15
3.4	Vista superior da proposta de refletor de Bragg, onde se destaca seu posicionamento em conjunto com a antena dipolo e o triângulo que forma a abertura central para reproduzir diagramas de irradiação semelhantes aos das cornetas cônicas metálicas tradicionais.	16
3.5	Diagramas de irradiação na forma retangular normalizados para a frequência de operação em 5,7 GHz, para $-180^\circ < \phi < +180^\circ$ no plano H ($\theta = 90^\circ$). A curva vermelha pontilhada representa o diagrama de irradiação da antena dipolo de meia onda atuando sem qualquer outra estrutura. As demais curvas representam o efeito da estrutura de Bragg no diagrama de irradiação da antena para diferentes valores de a conforme mostrado na legenda.	17
3.6	Campo elétrico em vetores para o dipolo e para o conjunto operando em 5,7 GHz considerando diferentes aberturas a	17

4.1	Coeficiente de reflexão em dB (S_{11}) para o dipolo de meia onda projetado para operar em 5,7 GHz sem (curva em vermelho) e com (curva em azul) a influência da estrutura de refletores de Bragg.	20
4.2	Análise, para a frequência de 5,7 GHz, do vetor de Poynting (a) no dipolo de meia onda com operação em 5,7 GHz e (b) no refletor dielétrico quase cilíndrico operando juntamente com a antena para aprimoramento de diretividade.	21
4.3	Magnitude do campo elétrico para análise do direcionamento da energia pela estrutura semi-cilíndrica dielétrica. Análise para operação em 5,7 GHz nas condições: (a) apenas a antena dipolo e (b) comportamento mais diretivo obtido pelos efeitos dos refletores de Bragg sobre a antena dipolo.	21
4.4	Diagrama de irradiação em 5,7 GHz normalizado, para a estrutura de Bragg posicionada ao redor da antena dipolo (curva azul tracejada) e a antena sem os efeitos de Bragg (curva vermelha pontilhada) para $0^\circ < \phi < 360^\circ$	22
4.5	Diagrama de irradiação tridimensional, na frequência de operação de 5,7 GHz, de uma antena dipolo de meia onda como as que compõem um AP (a) sem qualquer dispositivo para melhoramento de ganho e (b) com a estrutura de Bragg projetada para reflexão dos comprimentos de onda de operação da antena.	22
4.6	Ganho, em dBi, com relação a frequência, em GHz, da antena dipolo apenas, representada pela curva em vermelho pontilhada, e com a estrutura de Bragg posicionada em torno da antena, representada pela curva em azul tracejada. Análise realizada em 5,7 GHz, frequência de operação do WiFi.	23
5.1	Fotografias da Estrutura de Bragg quase cilíndrica fabricada na impressora 3D para caracterização experimental associada ao dipolo de meia onda.	26
5.2	Montagem utilizada para mensurar o coeficiente de reflexão na faixa de frequências de análise, de 5 até 6,5 GHz	26
5.3	Fotografias do levantamento experimental das características da estrutura proposta. Montagens utilizadas para mensurar o diagrama de irradiação em 5,7 GHz em azimute, plano perpendicular ao eixo do dipolo com polarização vertical. Vistas a partir (a) da recepção e (b) da transmissão. (c) Conjunto (irradiador e refletor Bragg) fixado em uma base dielétrica.	27
5.4	Comparação entre os coeficientes de reflexão com influência da estrutura de refletores de Bragg simulado e medido.	28
5.5	Medição (curva preta) e simulação (curva azul tracejada) dos diagramas de irradiação em coordenadas polares normalizados em azimute ($0^\circ < \phi < 360^\circ$) na frequência de 5,7 GHz, com o refletor dielétrico quase cilíndrico em atuação ao redor da antena.	29

Lista de Tabelas

3.1	Dimensões da estrutura de Bragg com comprimento de onda $\lambda_0 = 52$ mm, para operação na banda de frequências U-NII para redes IEEE 802.11 (5,15 GHz a 5,825 GHz).	17
5.1	Comparação do desempenho do refletor proposto com outras estruturas encontradas na literatura.	29

Lista de Abreviaturas e Siglas

AP	ponto de acesso (<i>access point</i>)
FEM	método dos elementos finitos (<i>finity element method</i>)
FSS	superfície seletiva em frequência (<i>frequency selective surface</i>)
HPBW	abertura de feixe de meia potência (<i>half power beamwidth</i>)
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
ISM	médica, científica e industrial (<i>industrial, scientific and medical</i>)
PLA	ácido polilático (<i>Polylactic acid</i>)
QWS	arranjo de quarto de onda (<i>quarter-wave stack</i>)
U-NII	Infraestrutura de informação nacional não licenciada (<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>)
WLAN	rede local sem fio (<i>wireless local area network</i>)

Lista de Símbolos

β	fator de fase da onda propagada
ϵ	permissividade dielétrica do meio
ϵ_r	permissividade dielétrica relativa do material
ϵ_o	permissividade dielétrica do vácuo
Γ	coeficiente de reflexão
μ	permeabilidade magnética do meio
μ_r	permeabilidade magnética relativa do material
μ_o	permeabilidade magnética do vácuo
θ_i	ângulo formado pelo raio incidente com relação à normal à interface que separa o meio 1 e o meio 2
θ_r	ângulo formado pelo raio refletido com relação à normal à interface que separa o meio 1 e o meio 2
θ_t	ângulo formado pelo raio transmitido com relação à normal à interface que separa o meio 1 e o meio 2
\vec{U}_1	representa os campos (elétrico e magnético) no meio 1
a	abertura da corneta
c	velocidade da luz no vácuo
d	espessura de cada espelho
d_1	espessura da camada material 1
d_2	espessura da camada material 2
m	número inteiro positivo
N	quantidade de espelhos de Bragg
n	índice de refração
n_1	índice de refração meio 1
n_2	índice de refração meio 2
R	coeficiente de reflexão
RU_{in}	campo refletido
T	coeficiente de transmissão
TU_{in}	campo transferido
U	intensidade do campo
U_{in}	amplitude do campo incidente no primeiro espelho
U_{ref}	campo total refletido no primeiro espelho
v_p	velocidade de fase de uma onda eletromagnética em um meio

Publicações

- Ribeiro, J.A.P.; Filgueiras, H.R.D.; Cerqueira Sodré Junior, A.; Beltrán-Mejía, F.; Mejía-Salazar, J.R. 3D-Printed Quasi-Cylindrical Bragg Reflector to Boost the Gain and Directivity of cm- and mm-Wave Antennas. *Sensors* **2021**, *21*, 8014.
- Ribeiro, J. A. P., Gonçalves, E., Ribeiro, J. A. J., Beltran-Mejia, F. Radiation pattern design by using 3D printed Bragg structures. *2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*. IEEE, **2019**, p. 1287-1290.

Resumo

Ribeiro, J.A.P. Refletor de Bragg Impresso em 3D para Aumentar o Ganho e a Diretividade de Antenas de Ondas Centimétricas e Milimétricas [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2021.

O surgimento de novas aplicações que utilizam tecnologias para comunicação sem fio representa um desenvolvimento expressivo nos sistemas de telecomunicações. No entanto, a falta de mecanismos apropriados para manipular os diagramas de irradiação, a fim de evitar sinais transmitidos para regiões indesejadas, ainda constitui uma desvantagem importante. Explorando o mecanismo de reflexão de Bragg empregado em estruturas fotônicas, projetamos e desenvolvemos um refletor quase cilíndrico com uma abertura para melhorar a diretividade de antenas de ondas milimétricas e centimétricas prontamente disponíveis, ou seja, sem alterar qualquer característica no projeto da antena. Em particular, usamos uma estrutura de Bragg construída por três bicamadas, as quais são feitas de materiais transparentes, para analisar o comportamento de um campo eletromagnético que atravessa a estrutura incidindo normalmente na superfície de cada bicamada. Esta análise verificou o dimensionamento das camadas condicionado à lei de Bragg para a estrutura oferecer alta refletividade. A abertura tem uma geometria triangular que se assemelha à ideia de uma antena corneta altamente diretiva. O projeto foi desenvolvido para operar em frequências WiFi convencionais baseadas nos padrões IEEE802.11 com o objetivo de ajustar a cobertura do sinal para o interior da residência. Análises numéricas baseadas em simulação foram realizadas utilizando o software ANSYS HFSS[®], em termos de coeficiente de reflexão, diagrama de irradiação, diretividade e ganho. As simulações mostraram o desempenho das camadas transparentes em conjunto com uma antena projetada para operação na mesma frequência do projeto, $f = 5,7$ GHz. Por fim, o refletor dielétrico em formato quase cilíndrico foi fabricado por meio de impressão em 3D e analisado experimentalmente. São apresentadas comparações entre os resultados obtidos nas caracterizações numérica e experimental. Notavelmente, observa-se a diretividade do diagrama de irradiação, em excelente concordância com as simulações numéricas. Reportam-se aumentos de ganho de mais de 400% em relação ao ganho da antena sem a estrutura de Bragg. Como resultado significativo, ressaltamos que a proposta desenvolvida para aplicações WiFi é uma estrutura econômica e fácil de construir. Portanto, é esperado que possa ser facilmente implementada por não especialistas, bastando ser colocada ao redor da antena para aumentar a diretividade e o ganho do sinal.

Palavras-Chave: antena, diretividade, diagrama de irradiação, ganho, impressão 3D,

refletor de Bragg, WiFi.

Abstract

Ribeiro, J.A.P. Refletor de Bragg Impresso em 3D para Aumentar o Ganho e a Diretividade de Antenas de Ondas Centimétricas e Milimétricas [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2021.

The emergence of new applications that use wireless communication technologies represent a significant development in telecommunications systems. However, the lack of appropriated mechanisms to manipulate the radiation patterns, in order to avoid signal transmission to undesired regions, still constitutes an important drawback. Exploiting the Bragg mechanism for reflecting used by photonic structures, we design and developed a quasi-cylindrical reflector with an aperture for improved directivity of readily available centimeter and millimeter wave antennas, i.e., without changing any feature of the antenna. In particular, we used a Bragg structure built by three bilayers, which are made of transparent materials, to analyze the behavior of an electromagnetic field with normal incidence on the surface of each bilayer of this structure. This analysis verified that the layers thickness according to Bragg law, the structure offers high reflectivity. The aperture has a triangular geometry that resembles the idea of a highly directional horn-like antenna. The design was developed to work at conventional WiFi frequencies based on the IEEE802.11 standards to adjust the signal coverage into the residence. Numerical analyses based in simulations were made using the ANSYS HFSS[®] software, in terms of reflection coefficient, radiation pattern, directivity and gain. The simulations shown the transparent layers performance together with an antenna designed for operating frequency at the exact same design frequency, 5,7 GHz. Lastly, the dielectric reflector in almost cylindrical shape was manufactured using 3D printing and experimentally analysed. Comparisons between the results obtained in the numerical and experimental characterization are presented. Remarkably, we observed an improved directionality of the radiation pattern, in excellent agreement with numerical simulations. Gain enhancements of more than 400% are reported in relation to the antenna gain without the Bragg structure. Significantly, the proposal is an economic and easy-to-build structure, which works with WiFi applications. Therefore, we hope our proposal can be easily implemented by non-specialists, just being placed around the antenna to improve the directivity and gain of the signal.

Keywords: 3D printing, antenna, bragg reflector, directivity, gain, radiation pattern, WiFi.

Capítulo 1

Introdução

ANTENAS de ondas centimétricas (cm) e milimétricas (mm) têm atraído muita atenção de pesquisadores durante as últimas décadas devido à sua vasta quantidade de aplicações em ambientes internos e externos. Em particular, essas antenas fornecem altas taxas de dados para comunicações de banda larga sem fio [1], sistemas de imagem [2], comunicações por satélite [3] e dispositivos de prevenção de colisão [4]. Apesar dessas vantagens, as ondas cm e mm sofrem graves efeitos prejudiciais na qualidade da transmissão do sinal devido às perdas de propagação (*path loss*) e/ou à presença de obstáculos [5]. Embora o uso de projetos de arranjos de antenas pareça a maneira mais natural de superar essas desvantagens, tal mecanismo pode ser caro ou complexo devido à necessidade de uma rede de alimentação com posicionamento geométrico preciso dos elementos irradiantes. Além disso, o grande número de elementos de alimentação em um arranjo também pode levar a efeitos de perda de transmissão. Então, estruturas geométricas periódicas, como os metamateriais [6, 7] e as lentes multicamadas [8–11], bem como as metassuperfícies [12–14], cuja periodicidade ocorre em um padrão bidimensional como uma interface ou superfície, surgiram como alternativas promissoras para o projeto e desenvolvimento de antenas diretivas de alto ganho. Todas essas abordagens são baseadas no uso de interfaces planas artificiais, cujas subestruturas possuem dimensões muito menores que o comprimento de onda de operação, para converter as ondas quase-esféricas irradiadas em ondas quase planas para aumento de ganho. A principal vantagem de usar essas lentes está na simplicidade de projeto e fabricação. No entanto, a implementação dessas lentes é dificultada pelos tamanhos relativamente grandes e larguras de banda de operação restritivas, tornando as antenas de lente volumosas e ineficientes.

Super-redes fotônicas, ou seja, camadas alternadas de materiais com diferentes índices de refração n , tornaram-se componentes essenciais de dispositivos optoeletrônicos e de micro-ondas devido à sua capacidade de adaptar e ajustar as propriedades de propagação de ondas eletromagnéticas [15–25]. Conhecem-se incontáveis aplicações dielétricas em multicamadas propostos para diferentes faixas de frequências. Estruturas *bandgap* eletromagnéticas [26, 27], cavidades de Fabry–Perot [28, 29], antenas ressonadoras dielétricas [30, 31], entre outros, são alguns exemplos. Particularmente importantes são os espelhos de Bragg, formados por uma sequência alternada de pares de camadas dielétricas com espessuras (levando em consideração

cada material) de um quarto do comprimento de onda de operação [32–34], que refletem completamente as ondas eletromagnéticas incidentes. Embora esses refletores sejam implementados para desenvolver cavidades para melhoramento do ganho em antena [35], menos atenção tem sido dada ao uso de espelhos de Bragg para aumentar a diretividade e o ganho de antenas prontamente disponíveis. Esta última aplicação poderia ser usada, por exemplo, para customizar a cobertura sem fio interna, o que não só melhora a recepção do sinal nas regiões desejadas, mas também aumenta a segurança, evitando técnicas de interceptação e o potencial roubo de informações.

O avanço exponencial das tecnologias para a comunicação sem fio tem possibilitado o desenvolvimento de tecnologias como Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT), onde as coisas passaram a estar permanentemente conectadas à rede. Neste contexto, dispositivos como câmeras, sensores, eletrodomésticos, smartphones, notebooks, carros e smartTVs estão todos conectados aos chamados pontos de acesso (*access points*, APs). No caso das aplicações residenciais, onde o número de APs costuma ser bem reduzido, há aplicações que deixam de desfrutar de sua melhor eficiência na comunicação sem fio devido à irradiação na direção de regiões não aproveitadas. Embora as aplicações industriais e ou empresariais contem com um número maior de APs, também poderiam ser grandemente otimizadas (em termos de eficiência e segurança) se todo o sinal estivesse irradiado para a região de interesse [36, 37]. Com esse cenário como motivação, este capítulo aborda também os objetivos, as contribuições e a estrutura do trabalho.

1.1 Contribuições e estrutura da dissertação

NESTE trabalho avalia-se o desempenho eletromagnético de estruturas de espelhos dielétricos para sistemas de micro-ondas aplicados em redes sem fio baseadas no protocolo de comunicação IEEE 802.11. A avaliação foi realizada numericamente e experimentalmente, com a finalidade de verificar o comportamento nas bandas de frequências utilizadas nessas redes sem fio conforme sua padronização. Os sucessivos espelhos são posicionados em torno da antena para obter os efeitos de refletividade desejados, com foco nas antenas de alto ganho necessárias para os atuais sistemas de comunicação. Os materiais e geometrias consideradas no trabalho podem ser facilmente implementadas, por exemplo, através da tecnologia de impressão em 3D [38–40].

As redes locais sem fio (*wireless local area networks*, WLANs) são usadas para fornecer conectividade a computadores, dispositivos móveis ou sistemas principalmente em ambientes residenciais. Os padrões IEEE 802.11 definem essas redes, que podem operar em diferentes faixas de frequência, incluindo a banda de frequências UNII (do inglês, *Unlicensed National Information Infrastructure*) de 5,15 GHz a 5,825 GHz [41, 42]. Os APs são os dispositivos que transformam os dados da rede cabeada em ondas de rádio e normalmente são compostos por antenas dipolo de meia onda. Cada braço desse tipo de antena tem comprimento próximo a um quarto do comprimento de onda na frequência de projeto. Para seu dimensionamento, em geral, toma-se por referência o comprimento de onda no vácuo (λ_0). Sua configuração é apresentada na Figura 1.1(a) e seu projeto comumente necessita de algum refinamento a fim de alcançar

a ressonância e o ajuste de impedância de entrada [43]. A antena dipolo possui diagrama de irradiação onidirecional no plano do campo magnético (plano H, transversal ao seu eixo) e apresenta uma abertura de feixe de aproximadamente 78° no plano do campo elétrico (plano E, paralelo ao seu eixo). Este comportamento está representado no diagrama tridimensional da Figura 1.1(b), obtido com o programa ANSYS HFSS[®] [44] na frequência de 5,7 GHz, utilizando as equações que descrevem o seu campo irradiado [43].

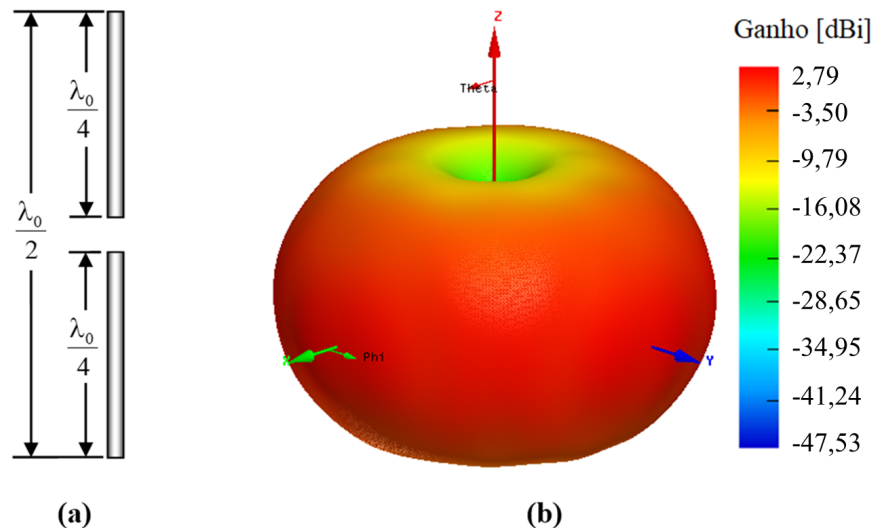


Figura 1.1: (a) Forma de uma antena dipolo de meia onda. (b) Diagrama de irradiação tridimensional em 5,7 GHz de um dipolo de meia onda e sua escala de ganho em dBi.

Pontos de acesso de uma rede sem fio estão ligados a uma rede cabeada para obter alimentação. Em uma residência, deseja-se a cobertura em todo o seu interior e mínima emissão para fora desse ambiente. Isto sugere a condição determinada pela emissão segundo o plano H, determinando que o dipolo tenha polarização vertical, isto é, com seu eixo perpendicular ao solo. Neste caso, seria recomendado o dispositivo instalado em uma região central, pois se posicionado próximo a uma parede, o sinal transmitido tende a ser recebido em residências vizinhas, em detrimento de cômodos pretendidos da residência desejada (Figura 1.2). Partindo da irradiação onidirecional desta antena no plano H, a proposta é modificar a distribuição espacial do campo irradiado. Esta alteração tem como objetivo reduzir o espalhamento para regiões indesejáveis e melhor concentrar o feixe emitido para os locais que devam ser privilegiados.

Nesse contexto, as principais contribuições deste trabalho são:

- um arranjo de quarto de onda (*quarter-wave stack*, QWS) com três bicamadas projetado a partir do comportamento de um campo eletromagnético que incide normalmente nesse meio periódico, demonstrando que os campos refletidos nas interfaces entre as camadas interferem-se construtivamente e o meio comporta-se como refletor para aumento de ganho e diretividade em antenas de ondas com comprimentos cm e mm;
- análise numérica por meio de simulação para avaliar o desempenho eletromagnético do QWS projetado para aplicações WiFi (na frequência de 5,7 GHz) e ajustar seu formato, atendendo à necessidade de alteração do diagrama de



Figura 1.2: Cobertura em uma residência da emissão de um dipolo com polarização vertical, com o ponto de acesso instalado próximo à parede, distribuindo parte do sinal fora da região de interesse.

irradiação produzido pelas antenas presentes nos APs, tornando o lobo principal mais definido como o de uma antena diretiva;

- construção por meio de impressão em 3D do QWS com três bicamadas projetado e simulado, para atuar como refletor em uma antena dipolo de meia onda (onidirecional no plano H) operando na frequência de 5,7 GHz, aumentando seu ganho e diretividade;
- análise experimental do desempenho eletromagnético do QWS impresso em 3D, apresentando resultados da modificação da distribuição geográfica da energia emitida pela antena após atravessar a estrutura em camadas, validando o projeto e as simulações.

Organizou-se o texto em 5 capítulos. No Capítulo 2, encontram-se as motivações para o uso de refletores em antenas e as teorias que envolvem as estruturas em camadas dielétricas, em especial os espelhos de Bragg. O Capítulo 3 apresenta o dimensionamento das camadas para maior refletividade e da abertura gradual para que o diagrama irradiado seja baseado no das antenas cornetas cônicas. No Capítulo 4, apresentam-se as análises numéricas de coeficiente de reflexão e de diagrama de irradiação para o conjunto, com comparações dos resultados com e sem o emprego da estrutura de melhoria da cobertura do sinal associada à antena. Para comprovar as previsões teóricas, no Capítulo 5 encontra-se a parte experimental do projeto. Por fim, no Capítulo 6 são feitos os comentários mais relevantes e apresentadas as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

Antenas com refletores

ANTENAS onidirecionais são bastante utilizadas nos sistemas de comunicações, especialmente o dipolo, que irradia de maneira aproximadamente igual em todas as direções do plano perpendicular ao seu eixo. Este tipo de antena é adequado em regiões onde é necessária cobertura distribuída uniformemente para todas as direções de uma área. Porém não é apropriado para ambientes onde é necessário buscar um maior alcance em determinada direção, para obter cobertura com qualidade no sinal aos usuários localizados nesta direção. Isto porque transmitindo em diferentes direções com relação ao usuário, entregam o sinal aos usuários desejados com apenas uma pequena parte da energia total entregue a todo o ambiente. Essa limitação motivou a utilização de refletores capazes de tornar esses irradiadores diretivos e com alto ganho.

Uma superfície posicionada atrás de um elemento irradiador é capaz de aumentar o campo eletromagnético irradiado na direção frontal. Dentro desta ideia, refletores capazes de concentrar a energia em uma determinada direção têm sido desenvolvidos com diversos formatos, dimensões, materiais e processos de construção, para aplicações nas bandas de frequências utilizadas pelas antenas das redes WiFi. Vantagens podem ser obtidas empregando-se refletores, tais como:

- aumento da área coberta: o ganho será maior quando comparado ao dipolo, por exemplo, para uma mesma potência de transmissão;
- diminuição de interferências: reduzindo os sinais em regiões indesejáveis devido à concentração do sinal na região desejada;
- maior segurança: uma transmissão diretiva reduz a possibilidade de um agente externo ao sistema interferir na rede.

Refletores são empregados desde os primeiros estudos da propagação eletromagnética, em 1888, nas experiências de Hertz para comprovação das teorias de Maxwell. Porém, ganharam muita importância na Segunda Guerra Mundial, quando houve grande evolução das aplicações de radar. Após esse período, o qual as pesquisas foram intensamente incentivadas devido a sua importância militar, os refletores passaram a ser empregados em várias outras aplicações civis, como radioastronomia, comunicações na faixa de micro-ondas e rastreamento de satélite. O que logo resultou no crescente interesse por antenas com refletores, conduzindo técnicas analíticas e experimentais para projetar a superfície do refletor para máximo ganho, pequenas

aberturas de feixe, adaptação para variadas frequências, flexibilidade no controle de suas características eletromagnéticas e maior economia. Portanto, desenvolveram-se diferentes geometrias, sendo as formas mais comuns e populares os refletores planos, de canto e de superfície curva (parabólica) [45].

Na literatura, foram encontrados diversos trabalhos de pesquisa demonstrando o emprego de refletores para regular a propagação do sinal WiFi conforme a cobertura desejada. Os trabalhos de Subrt e Pechac [46] e Dupre *et al* [47] propõem o uso de paredes baseadas em superfície seletiva de frequência (FSS, do inglês *Frequency Selective Surface*) para refletir as ondas e controlar a propagação, porém essas paredes são feitas de materiais especiais e requerem mudanças a nível de infraestrutura. Em um trabalho mais recente, Han e Shin [48] estudam a instalação de várias placas de metal dentro do espaço de propagação que podem melhorar o desempenho de um AP em termos de distribuição do sinal. Eles analisam a intensidade da recepção em diferentes locais dentro do ambiente, mas esta abordagem também envolve mudanças consideráveis no meio.

Uma solução é usar refletores que possam ser facilmente incorporados nos APs atuais. Os refletores de canto oferecem essa particularidade, cujo modelo convencional compreende um elemento de excitação e duas chapas condutoras que se conectam em um vértice, formando um ângulo estabelecido [43]. Na prática, eles não são constituídos por lâminas metálicas, mas sim por fios cilíndricos condutores, fitas metálicas ou por uma tela de fios de metal trançados. A literatura apresenta variadas propostas a fim de alcançar maior diretividade e largura de feixe mais estreita e, como resultado, antenas de alto ganho para as redes IEEE802.11. No entanto, os refletores apresentados por Chatterjee e Parui [49] e por Elzwawi *et al* [50] são baseados em FSS com designs complexos. Um modelo de refletor parabólico metálico que aumenta o ganho da antena WiFi, melhorando a irradiação em diferentes distâncias e ângulos foi proposto por Li e Lane [51]. Os trabalhos de Chan *et al* [52] e Xiong *et al* [53] projetam um modelo de refletor para impressão 3D e o cobrem com material reflexivo, como uma folha de alumínio.

2.1 Camadas transparentes como refletor

Quando há uma descontinuidade no meio em que uma onda eletromagnética plana se propaga, ou seja ela encontra uma superfície que separa duas regiões com propriedades eletromagnéticas diferentes, parte da energia é transferida para o segundo meio e outra parte retorna ao primeiro meio. Os campos (elétrico e magnético) que constituem as duas novas ondas devem satisfazer as equações diferenciais de Maxwell, as quais descrevem as leis da teoria eletromagnética, e as condições de contorno na interface entre os dois meios.

2.1.1 Reflexão e Refração na interface entre meios

O comportamento da onda que encontra uma descontinuidade nas características elétricas e magnéticas, como permissividade, permeabilidade e condutividade, do meio material em que se propaga está relacionado com a geometria da superfície da des-

continuidade, o ângulo de incidência nessa superfície e pela diferença entre as características dos materiais. Considera-se uma interface plana de separação entre dois meios transparentes 1 e 2 com diferentes índices de refração n_1 e n_2 . Um meio é considerado transparente quando permite que a luz passe por ele de forma regular e bem definida, além da visualização nítida de objetos através dele. Se nessa interface ocorre a incidência de uma onda plana com intensidade U , esta é parcialmente refletida de volta para o meio 1 e parcialmente transferida para o meio 2. A Figura 2.1 mostra esse processo a partir dos conceitos de óptica geométrica (GO - *Geometrical Optics*), técnica que descreve a propagação da luz utilizando raios. Neste método de análise, a luz pode ser vista como uma onda eletromagnética se propagando e pode ser representada por uma linha para modelar a incidência, a reflexão e a refração a partir de uma superfície. Os conceitos da óptica geométrica podem ser deduzidos a partir do Princípio de Fermat, que afirma que a luz que percorre a distância entre dois pontos sempre segue a trajetória que leva o menor tempo possível [54], [55].

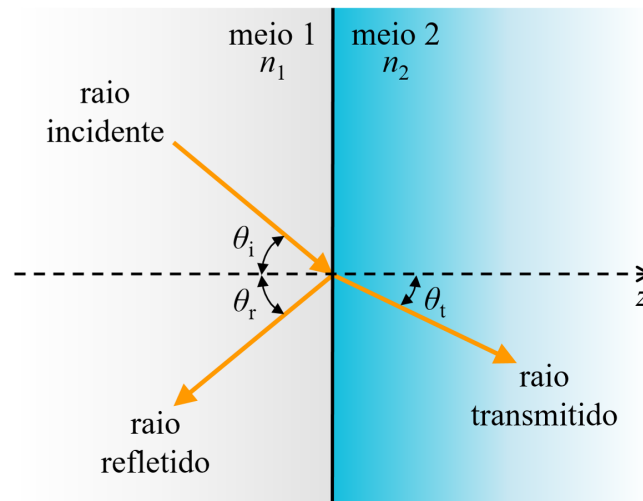


Figura 2.1: Incidência oblíqua em uma interface dielétrica onde $n_1 < n_2$.

Os ângulos formados pelos raios incidente, refletido e transmitido com relação à normal à interface que separa o meio 1 e o meio 2 (eixo z) são identificados como θ_i , θ_r e θ_t respectivamente. Eles obedecem leis que os relacionam nos processos de reflexão e refração. A Segunda Lei da Reflexão que diz que os ângulos de incidência e de reflexão são iguais [55] e a Lei da Refração, conceito conhecido como Lei de Snell [56]:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t. \quad (2.1)$$

Uma situação mais simples ocorre quando a incidência na interface entre os meios transparentes é normal (Figura 2.2). Os campos (elétrico e magnético) das ondas incidente, refletida e transmitida entre os meios são expressos em função dos coeficientes de reflexão (R) e transmissão (T). No caso da incidência normal, os campos satisfazem as condições de contorno em $z = 0$ de acordo com

$$U_{\text{in}} + RU_{\text{in}} = TU_{\text{in}}, \quad (2.2)$$

para um campo U no meio dielétrico 1, com índice de refração n_1 , propagando na direção positiva de z e polarizado na direção positiva de x com amplitude U_{in} . A equação descrita deste campo é

$$U = U_{\text{in}} e^{-i\beta z}, \quad (2.3)$$

considerando o fator de fase da onda propagada com a distância d percorrida por ela com $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, sendo λ_0 o comprimento de onda no vácuo. Ao incidir perpendicularmente ($\theta_i = \theta_r = \theta_t = 0$) na superfície que separa o meio 1 de outro meio dielétrico (meio 2), é parcialmente refletido de volta para o meio 1 e parcialmente transferido para o meio 2. Os raios refletido e transmitido também são perpendiculares à superfície da interface. Portanto, um campo refletido

$$RU = RU_{\text{in}} e^{i\beta z} \quad (2.4)$$

propaga de volta no meio 1 e um campo transmitido

$$TU = TU_{\text{in}} e^{-i\beta z} \quad (2.5)$$

continua no meio 2 propagando na direção positiva de z . No meio 2 há apenas a propagação da onda refratada. No entanto, no meio 1 ocorre a propagação da onda incidente e da onda refletida, de modo que o campo total no meio 1 é dado por

$$\vec{U}_1 = U_{\text{in}} e^{-i\beta z} + RU_{\text{in}} e^{i\beta z}, \quad (2.6)$$

onde \vec{U}_1 representa os campos (elétrico e magnético) no meio 1.

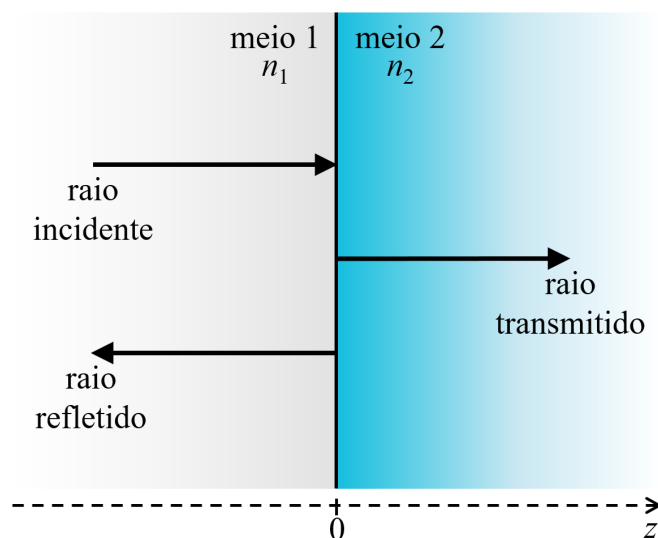


Figura 2.2: Dois meios dielétricos separados por uma superfície plana. O campo incidente do meio 1 é parcialmente refletido e parcialmente transmitido para o meio 2.

2.1.2 Refletores de Bragg

Ao unir sucessivos pares alternados de dois diferentes meios, ocorre uma sequência de descontinuidades nas características eletromagnéticas. Isto faz com que os meios transparentes quase totalmente transmissivos proporcionem alta refletividade. Esta característica motivou a aplicação de espelhos de Bragg como um refletor para antenas de ondas centimétricas e milimétricas que visam melhor distribuição espacial do campo irradiado.

Com base nos primeiros trabalhos sobre difração de raios X por cristais [57], William Henry Bragg e seu filho William Lawrence Bragg consideraram um cristal definido por uma sucessão de átomos dispostos em planos paralelos [58], conforme a Figura 2.3. Devido à sua forma, quando o cristal é submetido a incidência de definido comprimento de onda, são observados feixes com máximos intensos espalhados. Os diversos feixes difratados são considerados como reflexões pelos sucessivos planos no cristal. Para o máximo de reflexão, deve ser satisfeita a condição de interferência construtiva, a qual se dá pela diferença de caminho óptico entre as ondas refletidas pelos planos atômicos consecutivos. Portanto, a interferência construtiva é obtida impondo-se que essa diferença de caminho percorrido pelas ondas refletidas em cada plano seja igual a um múltiplo do comprimento de onda. Verificando os triângulos retângulos ABo e BCo, tem-se $AB = BC$ e $AB = d \sin \theta$. Ou seja, a distância d entre os sucessivos planos paralelos está relacionada com o comprimento de onda λ e o ângulo θ por

$$m\lambda = 2AB = 2d \sin \theta, \quad (2.7)$$

onde m é um número inteiro positivo ($m = 1, 2, 3, \dots$) e $\theta_i = \theta_r = \theta$, uma vez que da Segunda Lei da Reflexão, o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são iguais.

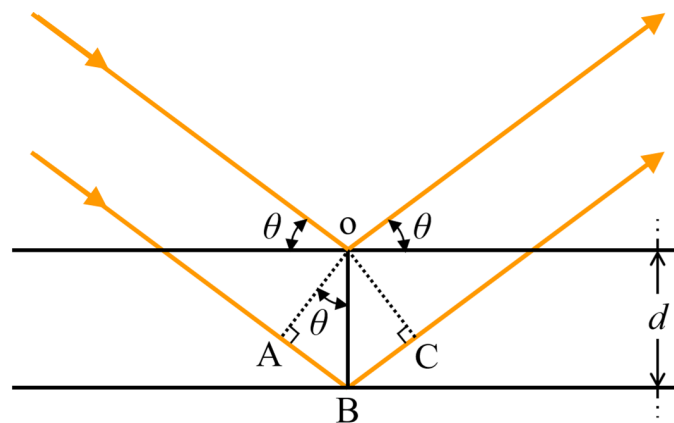


Figura 2.3: Difração de raio-x por uma sucessão de planos atômicos paralelos separados por d , para um dado ângulo de incidência θ .

Os estudos de W. L. Bragg [58–60] com seus arranjos atômicos revolucionaram o ramo da cristalografia de raios-X. Estes trabalhos foram particularmente importantes para o início do desenvolvimento da cristalografia de raios-X, assunto que possibilitou estudar as estruturas cristalinas e o espaçamento atômico em diversos materiais. Bragg

interpretou os resultados de experimentos feitos no início de 1912, os quais mostraram que os raios-X podem ser espalhados por um cristal, solucionando muitas estruturas de cristal por um processo simples para visualizar e realizar o cálculo. A lei de Bragg relaciona o comprimento de onda λ_0 , o ângulo de incidência θ_i (ou de reflexão θ_r) e o espaçamento entre os planos atômicos paralelos d , afirmando que a diferença de percurso entre duas reflexões em planos seguidos da estrutura deve ser um múltiplo de λ_0 para que ocorra o máximo de reflexão.

Uma estrutura finita construída conforme a condição imposta pela lei de Bragg, posicionada de modo que receba incidência com um ângulo estipulado é capaz de refletir grande parte da energia irradiada por uma antena, considerando comprimentos de ondas cm e mm. O que indica o comportamento dos pares de camadas como refletor. O valor da refletância aproxima-se da unidade, com uma pequena parcela sendo transferida ao fim da última camada, se a quantidade de pares alternados dos dois diferentes meios for suficientemente grande [18]. Portanto, a onda é refletida quase completamente utilizando grande número de pares e conforme o dimensionamento condicionado à lei de Bragg e o formato das camadas.

Capítulo 3

Refletor de Bragg aplicado à antena do roteador IEEE 802.11

O projeto desenvolvido tem por objetivo aplicação em redes sem fio baseadas no protocolo de comunicação IEEE 802.11. Essas redes podem operar em diferentes faixas de frequências: a banda ISM, entre 2,4 GHz e 2,4835 GHz, e a banda U-NII, de 5,15 GHz a 5,825 GHz. Conforme a padronização, os pontos de acesso sem fio dessas redes utilizam antenas que irradiam onidirecionalmente no plano H, principalmente antenas do tipo dipolo de meia onda. Essa característica do diagrama de irradiação pode acarretar pouca ou nenhuma cobertura em determinados pontos, impedindo o funcionamento de aplicações nessas regiões. Uma solução seria utilizar a refletividade dos espelhos de Bragg, formados por uma sequência alternada de N pares de camadas dielétricas com diferentes índices de refração, n_1 e n_2 [20]. Uma estrutura possível seria um arranjo com espessuras de quarto de onda (QWS), isto é, cada camada com espessura correspondente a um quarto do comprimento de onda, levando em conta o respectivo índice de refração (Figura 3.1). Assim, se as camadas sucessivas tiverem espessuras d_1 e d_2 , tem-se $d_1 = (1/4)(\lambda_o/n_1)$ e $d_2 = (1/4)(\lambda_o/n_2)$. Por conseguinte,

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \frac{\lambda_o}{4}. \quad (3.1)$$

Determina-se o índice de refração de um meio dielétrico sem perdas como a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade de propagação da onda eletromagnética nesse meio (v_p) [61]:

$$n = \frac{c}{v_p} = \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_o\epsilon_o}} = \sqrt{\mu_r\epsilon_r}, \quad (3.2)$$

onde μ e ϵ são a permeabilidade magnética e a permissividade dielétrica do meio, μ_o e ϵ_o são a permeabilidade magnética e a permissividade dielétrica do vácuo, e μ_r e ϵ_r são a permeabilidade magnética relativa e a permissividade dielétrica relativa do material. Para a maior parte dos materiais dielétricos, a permeabilidade magnética relativa é próxima da unidade [62]. Então, considera-se $\mu_r = 1$ para ambos materiais empregados neste desenvolvimento.

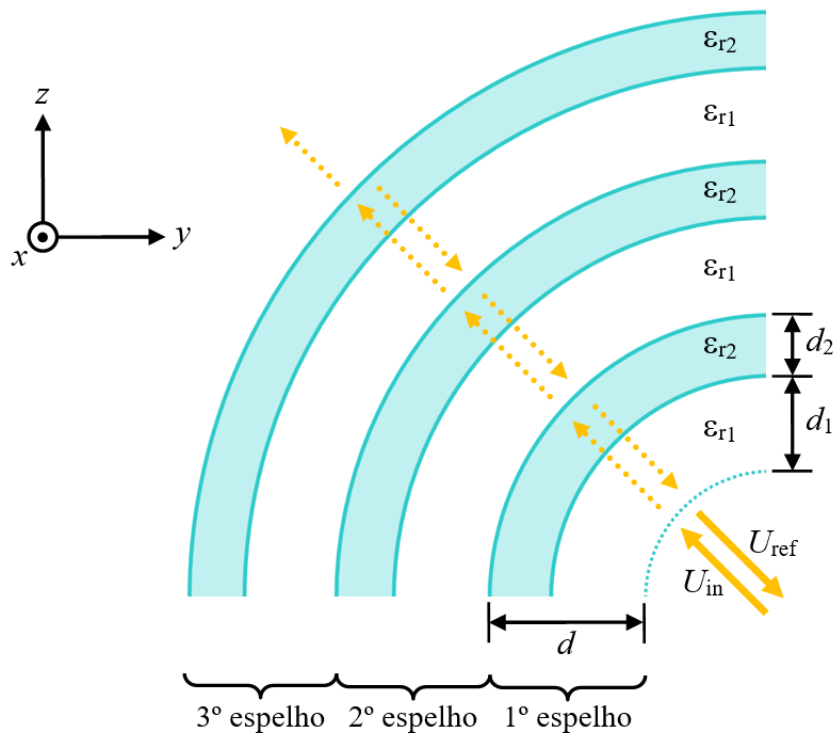


Figura 3.1: *QWS composto por 3 espelhos de espessura d , construídos com dois diferentes materiais dielétricos em pares de camadas alternadas de espessuras d_1 e d_2 , para estudo da ação de multicamadas dielétricas periódicas quando há incidência normal de uma onda eletromagnética.*

3.1 Propagação da onda eletromagnética entre camadas dielétricas

O comportamento da onda eletromagnética com incidência normal nas superfícies dos três espelhos do QWS é estudado através da Figura 3.1. Nesse desenvolvimento, os coeficientes de reflexão (R) e transmissão (T) quantificam as parcelas do campo incidente no espelho que são refletida e transmitida, respectivamente. Como foram admitidos que os materiais sejam dielétricos transparentes, isto é, quase totalmente transmisivos, cada espelho possui pequeno coeficiente de reflexão. Portanto, considera-se o campo total refletido no primeiro espelho (U_{ref}) como a soma das contribuições das reflexões em todos os espelhos dentro do meio periódico [56]. Considerando U_{in} a amplitude do campo incidente no primeiro espelho, resulta um campo refletido RU_{in} e outro transferido TU_{in} na interface do meio externo com o espelho. A parte transferida para o interior do meio periódico percorre uma distância d deslocando-se em direção ao espelho seguinte. Com a incidência no segundo espelho sofre nova reflexão e nova transmissão. Assim, tem-se um campo refletido nesse segundo espelho e que retorna ao primeiro e sofre nova refração ao ser transferido para o meio original. A reflexão no segundo espelho deve ser descrita como $RTU_{\text{in}} e^{-i\beta d}$ e o campo nele transferido será $TTU_{\text{in}} e^{-i\beta d} = T^2U_{\text{in}} e^{-i\beta d}$, sendo β o fator de fase na região entre os espelhos e d o percurso na região. Observar que o campo refletido no segundo espelho ao chegar ao primeiro efetua um trajeto igual a $2d$. A parcela refratada novamente propaga-se por

um novo trecho d . Ao atingir o terceiro espelho, tem-se nova reflexão e nova refração. O campo refletido no terceiro espelho será $RT^2U_{\text{in}}e^{-i2\beta d}$ e percorre $4d$ para chegar ao primeiro. Então, o campo refletido na interface do primeiro espelho é

$$U_{\text{ref}} = RU_{\text{in}} + (RTU_{\text{in}}e^{-i2\beta d}) + (RT^2U_{\text{in}}e^{-i4\beta d})T^2, \quad (3.3)$$

considerando o fator de fase da onda propagada com a distância d percorrida por ela com $\beta = 2\pi/\lambda_0$, sendo λ_0 o comprimento de onda no vácuo.

Considerando uma quantidade de três espelhos, a relação entre o campo total refletido e o campo incidente define o coeficiente de reflexão da estrutura:

$$R_{\text{f}} = \frac{U_{\text{ref}}}{U_{\text{in}}} = R(1 + T^2 e^{-i2\beta d} + T^4 e^{-i4\beta d}). \quad (3.4)$$

Após multiplicar os dois membros de (3.4) por $(1 - T^2 e^{-i2\beta d})$, acha-se o coeficiente de reflexão total

$$R_{\text{f}} = R \left[\frac{1 - (T^2 e^{-i2\beta d})^3}{1 - (T^2 e^{-i2\beta d})} \right], \quad (3.5)$$

cujos módulo é

$$|R_{\text{f}}| = |R| \left[\sqrt{\frac{1 + |T|^{12} - 2|T|^6 \cos[6(\beta d - \phi)]}{1 + |T|^4 - 2|T|^2 \cos[2(\beta d - \phi)]}} \right]. \quad (3.6)$$

Generalizando para uma quantidade N de espelhos, o coeficiente de reflexão final e seu módulo na face de entrada da onda incidente no primeiro espelho podem ser escritos em expressões de ordem N como, respectivamente:

$$R_{\text{f}} = R \left[\frac{1 - (T^2 e^{-i2\beta d})^N}{1 - (T^2 e^{-i2\beta d})} \right] \quad (3.7)$$

e

$$|R_{\text{f}}| = |R| \left[\sqrt{\frac{1 + |T|^{4N} - 2|T|^{2N} \cos[2N(\beta d - \phi)]}{1 + |T|^4 - 2|T|^2 \cos[2(\beta d - \phi)]}} \right]. \quad (3.8)$$

Admitindo-se que não haja absorção de energia no trecho d da estrutura, a potência transmitida é a diferença entre a potência incidente e a refletida. Conclui-se que deve ser satisfeita a relação

$$|T|^2 + |R|^2 = 1 \quad (3.9)$$

e o módulo do coeficiente de reflexão total na primeira interface da estrutura pode ser representado por

$$|R_f| = |R| \left[\sqrt{\frac{1 + |1 - |R|^2|^6 - 2|1 - |R|^2|^3 \cos[6(\beta d - \phi)]}{1 + |1 - |R|^2|^2 - 2|1 - |R|^2| \cos[2(\beta d - \phi)]}} \right]. \quad (3.10)$$

Atribuindo valores ao argumento total $(\beta d - \phi)$ na Eq. (3.10), é possível mostrar que o módulo do coeficiente de reflexão final no primeiro espelho ($|R_f|$) possui seus pontos máximos nas situações em que o argumento total é múltiplo inteiro de π . Isso significa que se o espaçamento entre os espelhos (d) estiver relacionado com o comprimento da onda incidente (λ_o), os campos refletidos de todas as interfaces correspondem-se em fase quando atingem a superfície frontal. Ou seja, as ondas interferem-se construtivamente umas com as outras e a estrutura atua com alto coeficiente de reflexão [62]. Para estudar esse comportamento, apresentado na Figura 3.2, utilizou-se o programa MATLAB. Com $|R_f|$ máximos ocorrendo a cada π radianos e considerando $\beta = 2\pi/\lambda_o$, conclui-se que a espessura d deve ser um múltiplo de meio comprimento de onda. Essa condição geométrica respeita a Equação (2.7), conhecida como lei de Bragg, para uma onda que incide normalmente na superfície de entrada do primeiro espelho da estrutura dielétrica para obter alta reflexão do campo em determinado comprimento de onda. Nesse caso, para a onda que incide normalmente, os campos em todas as superfícies estão em fase quando

$$d = m \frac{\lambda_o}{2} \quad (3.11)$$

onde m é um inteiro positivo [20]. Pelo fato de cada espelho (pares de camadas) possuir espessura de meio comprimento de onda, verifica-se que a condição de Bragg é atendida no QWS com camadas dimensionadas pela Eq. (3.1).

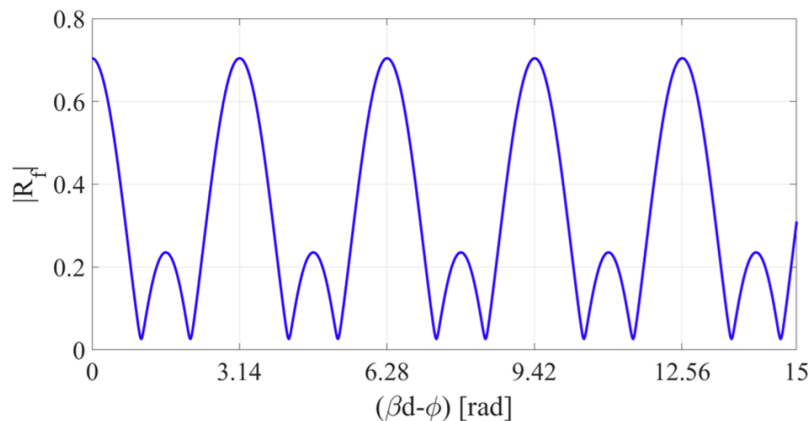


Figura 3.2: Módulo do coeficiente de reflexão total na face de entrada da estrutura dielétrica $|R_f|$ para estudar seu comportamento refletivo.

Em cada interface que separa um meio material transparente de outro, o total refletido é uma porcentagem muito pequena do total incidente (abaixo de 10%). Considerando portanto materiais quase totalmente transmissivos, nesse desenvolvimento aplicou-se $R = 0,1$ na Eq. (3.10) para o gráfico típico da Figura 3.2. A transparência

dos dois meios fazem com que ocorra pequenos coeficientes individuais. Em contrapartida, observam-se máximos com alto valor para o coeficiente de reflexão $|R_f|$. Este comportamento indica que a onda retorna quase completamente para o meio de origem e a refletância tende a ser próxima à unidade, com uma pequena parcela de energia transmitida pela última camada da estrutura periódica.

3.2 Geometria da estrutura de Bragg para o máximo de reflexão

A geometria dos espelhos de Bragg para aprimorar a emissão das antenas presentes nos pontos de acesso das redes sem fio residenciais, baseou-se no formato do diagrama de irradiação dessas antenas. Um cilindro disposto em torno da origem da irradiação é capaz de receber incidência quase normal em sua face, considerando a origem um dipolo de meia onda como os presentes nos APs e, portanto, diagrama de irradiação onidirecional. Por esse motivo, cada camada possui formato cilíndrico e, além disso, uma abertura cônica partindo do centro da estrutura foi criada para concentrar o feixe e melhor destinar a emissão. A Figura 3.3 ilustra essa configuração. Foram consideradas camadas com o material dielétrico ácido polilático (*Polylactic acid*, PLA) separadas por ar. Esse material é comumente utilizado em impressões 3D e possui permissividade elétrica relativa ($\epsilon_{r_{PLA}}$) igual a 2,9 [63]. Todo dielétrico possui permissividade e permeabilidade relativas. As do ar são $\epsilon_{r_{ar}} = \mu_{r_{ar}} = 1$. Conhecendo $\mu_{r_{PLA}} = \mu_{r_{ar}} = \mu_r = 1$, o índice de refração é dado apenas pela raiz quadrada da permissividade elétrica relativa dos meios (ϵ_{r_1} e ϵ_{r_2}). Logo, $n_{ar} = 1$ e $n_{PLA} = 1,7$.

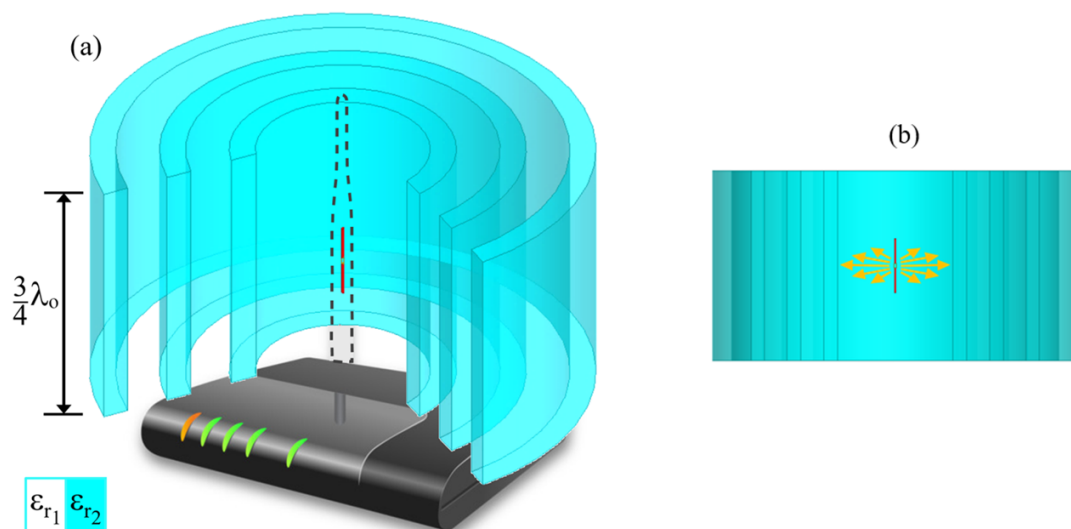


Figura 3.3: Configuração do QWS desenvolvido na forma de cilindros com abertura central em duas diferentes vistas: (a) tridimensional e (b) frontal.

Com a concentração da energia emitida pelo conjunto composto por antena e espelhos tem-se diretividade. A abertura cônica tem o objetivo de aproximar o diagrama de irradiação ao de uma antena corneta cônica metálica tradicional, fornecendo uma

transição gradual para o ambiente externo à estrutura dielétrica. Como ilustra a Figura 3.4, ela inicia a partir de um vértice distanciado de $1/4$ do comprimento de onda do centro da primeira camada do dielétrico PLA, local exato em que está posicionada a antena dipolo de alimentação do sistema, representada pelo ponto em vermelho.

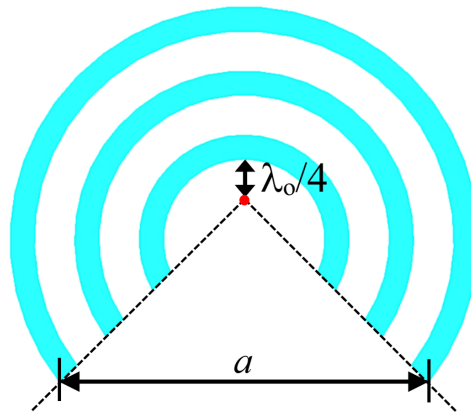


Figura 3.4: Vista superior da proposta de refletor de Bragg, onde se destaca seu posicionamento em conjunto com a antena dipolo e o triângulo que forma a abertura central para reproduzir diagramas de irradiação semelhantes aos das cornetas cônicas metálicas tradicionais.

Avaliou-se numericamente a funcionalidade da estrutura a partir de simulações feitas através do método dos elementos finitos (*finitly element method*, FEM) no programa Ansys HFSS® [44]. Busca-se que tenha uma melhor diretividade, minimizando a energia de lobos secundários em direções distintas à estabelecida pelo projeto. Por isso, para o dimensionamento da abertura da corneta, a , analisou-se o nível de lobos laterais, conforme mostra a Figura 3.5. Foram verificados os diagramas de irradiação normalizados para diferentes valores de a , estando os resultados com menores níveis de lobos secundários entre $2\lambda_0$ e $2,5\lambda_0$. O diagrama onidirecional irradiado pelas antenas dos APs é visto em vermelho pontilhado. A curva tracejada em azul representa $a = 117$ mm para o conjunto operando em 5,7 GHz. Ela mostra lobo principal diretivo com relação de 5,8 dB entre este e o lobo secundário. Portanto, possui a maior relação quando comparada às demais curvas. Em verde, para $a = 104$ mm, a relação é 3,6 dB e em cor de laranja, para $a = 130$ mm, tem-se 4,9 dB de diferença entre os lobos. Devido ao nível de lobos laterais mais baixo, e portanto melhor qualidade na comunicação com menor interferência, foi definido o valor representado pela curva em azul para a abertura a . Tem-se na Figura 3.6, as simulações para o campo elétrico em vetores alterando a com os mesmos valores, mostrando a distribuição modificada do campo. Na Tabela 3.1 encontram-se os parâmetros geométricos para o projeto operar em redes IEEE 802.11 na frequência de 5,7 GHz .

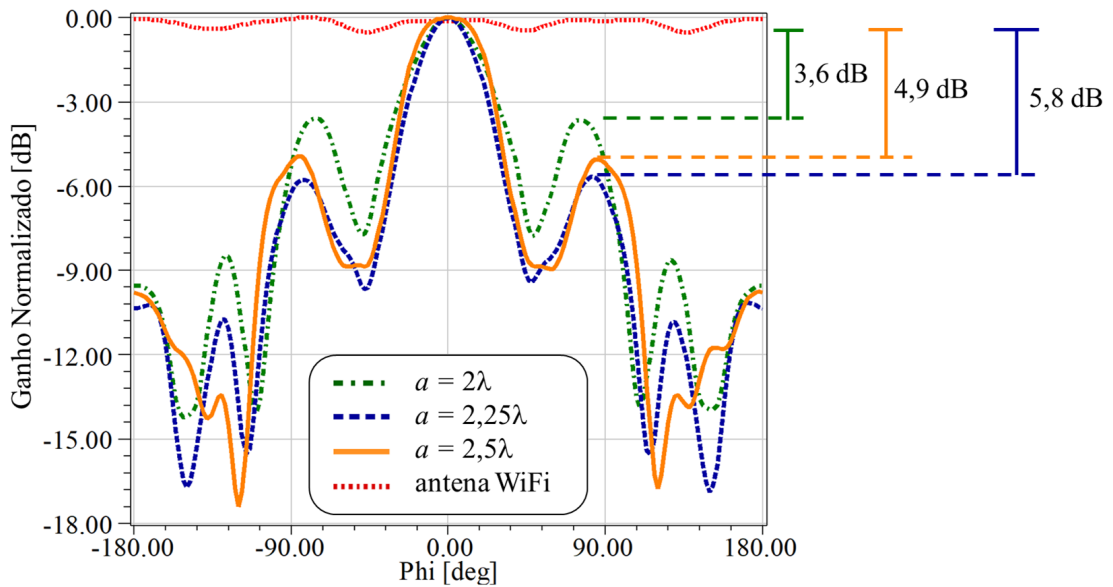


Figura 3.5: Diagramas de irradiação na forma retangular normalizados para a frequência de operação em 5,7 GHz, para $-180^\circ < \phi < +180^\circ$ no plano H ($\theta = 90^\circ$). A curva vermelha pontilhada representa o diagrama de irradiação da antena dipolo de meia onda atuando sem qualquer outra estrutura. As demais curvas representam o efeito da estrutura de Bragg no diagrama de irradiação da antena para diferentes valores de a conforme mostrado na legenda.

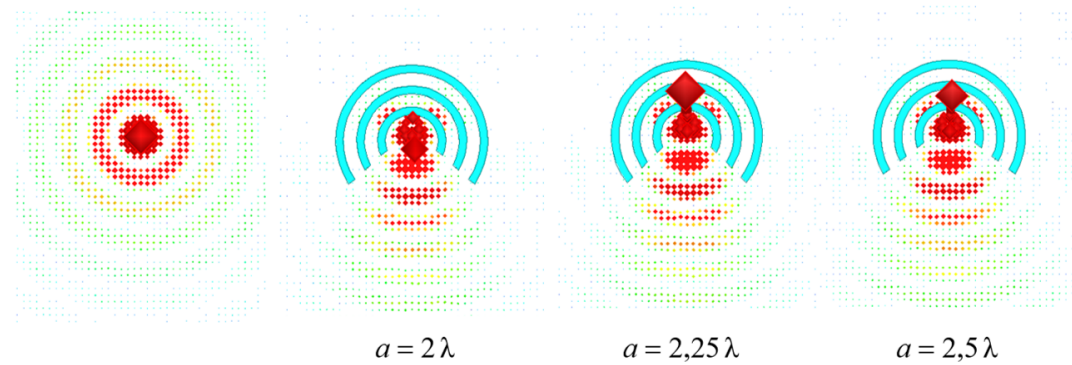


Figura 3.6: Campo elétrico em vetores para o dipolo e para o conjunto operando em 5,7 GHz considerando diferentes aberturas a .

Tabela 3.1: Dimensões da estrutura de Bragg com comprimento de onda $\lambda_o = 52$ mm, para operação na banda de frequências U-NII para redes IEEE 802.11 (5,15 GHz a 5,825 GHz).

Parâmetros geométricos para o projeto da estrutura de Bragg com $\lambda_o = 52$ mm	
Espessura das camadas de ar	$d_1 = 13$ mm
Espessura das camadas de PLA	$d_2 = 8$ mm
Abertura máxima central	$a = 2,25\lambda_o = 117$ mm
Altura da estrutura	$h = 1,5\lambda_o = 78$ mm

Capítulo 4

Análise numérica do sistema irradiante proposto

PARA averiguar a abordagem apresentada no Capítulo 3, o sistema irradiante operando na faixa de frequências estabelecida para redes WiFi que varia de 5,15 GHz a 5,825 GHz foi analisado através de simulação numérica. O projeto e os resultados numéricos foram obtidos por meio do programa ANSYS HFSS[®]. Admitindo-se as propriedades eletromagnéticas dos materiais ar e PLA para a geometria e as dimensões calculadas, um modelo com o comportamento da estrutura projetada foi analisado numericamente em termos de coeficiente de reflexão, ganho e diagrama de irradiação. Para essa análise do sistema simulado, um dipolo de meia onda com $\lambda_o = 52$ mm alimenta a estrutura.

4.1 Comportamento do coeficiente de reflexão

Para a análise da ressonância, definiu-se a faixa de frequências entre 5 GHz e 6 GHz. Esse estudo é visto na Figura 4.1, onde analisou-se numericamente o comportamento do coeficiente de reflexão (S_{11}), tomando valores de S_{11} inferiores a -10 dB como aceitáveis para identificar a banda de frequências de operação. A curva em azul representa a situação em que há a presença dos espelhos dielétricos e na curva em vermelho tem-se o S_{11} da antena dipolo de meia onda projetado para operar nessa faixa de frequências (com $\lambda = 52$ mm). Observa-se pouca alteração no casamento de impedâncias do conjunto irradiante, cuja banda de operação simulada foi de 1,12 GHz, se comparado ao dipolo operando isolado na análise numérica. Entre as duas situações, existe uma diferença de 60 MHz no limite inferior e de 10 MHz no limite superior da banda de frequências de operação.

4.2 Diretividade do diagrama de irradiação

A análise da Figura 4.1 indica os níveis de reflexão (em dB) na entrada do sistema, porém não mostra o comportamento da irradiação. Considerou-se a frequência de 5,7 GHz para verificar propriedades como o ganho, a diretividade e a variação es-

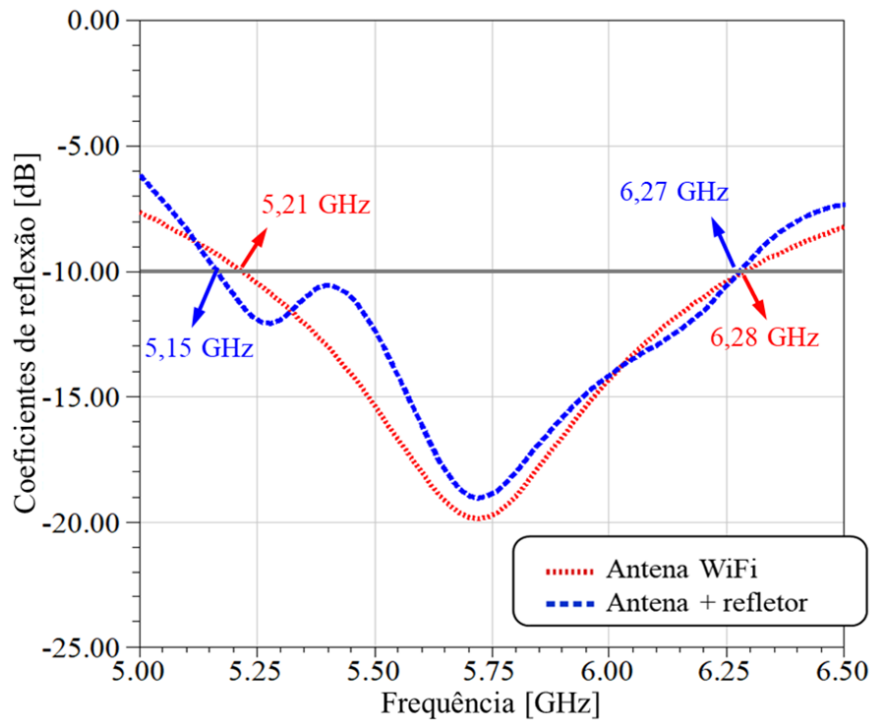


Figura 4.1: Coeficiente de reflexão em dB (S_{11}) para o dipolo de meia onda projetado para operar em 5,7 GHz sem (curva em vermelho) e com (curva em azul) a influência da estrutura de refletores de Bragg.

pacial da energia emitida. Primeiramente, foi feito um estudo do vetor de Poynting, considerando a frequência de projeto para a antena e os espelhos, na Figura 4.2. O vetor de Poynting é definido como o fluxo da energia local por unidade de área, indicando a densidade de potência instantânea, cuja unidade é W/m^2 . Assim, é possível estudar como a energia é distribuída no espaço, encontrando a densidade de energia em cada ponto. A Figura 4.2(a) mostra a distribuição de energia que parte da antena, com vetores de densidade de potência distribuídos em todas as direções. Após passar pela estrutura de Bragg, a energia é direcionada como pode ser visto na Figura 4.2(b) e os vetores aproximam-se de se tornarem paralelos entre si.

A magnitude do campo elétrico é analisada nas Figuras 4.3(a) e 4.3(b), as quais apresentam o direcionamento da onda que parte da fonte primária ao passar pelos efeitos provocados pela estrutura de refletores dielétricos. Comprova-se o efeito da transformação de ondas quase-esféricas em ondas quase planas. Ainda há energia saindo pelos lados da estrutura, o que diminui a eficiência de irradiação.

Na Figura 4.4 representam-se os desempenhos das ondas irradiadas nas diferentes situações: a antena dipolo de meia onda de um AP sem qualquer dispositivo para melhoramento (curva em vermelho pontilhada) e ao posicionar os espelhos dielétricos ao redor do irradiador (curva em azul tracejada). Analisando os diagramas de irradiação normalizados, é possível observar o estreitamento do feixe na direção $\phi = 0$ para a análise feita em 5,7 GHz (Figura 4.4). Com a ação da estrutura, a abertura de feixe de meia potência (*half power beamwidth*, HPBW) é igual a 46° .

Utilizando o diagrama de irradiação tridimensional acompanhado de sua escala

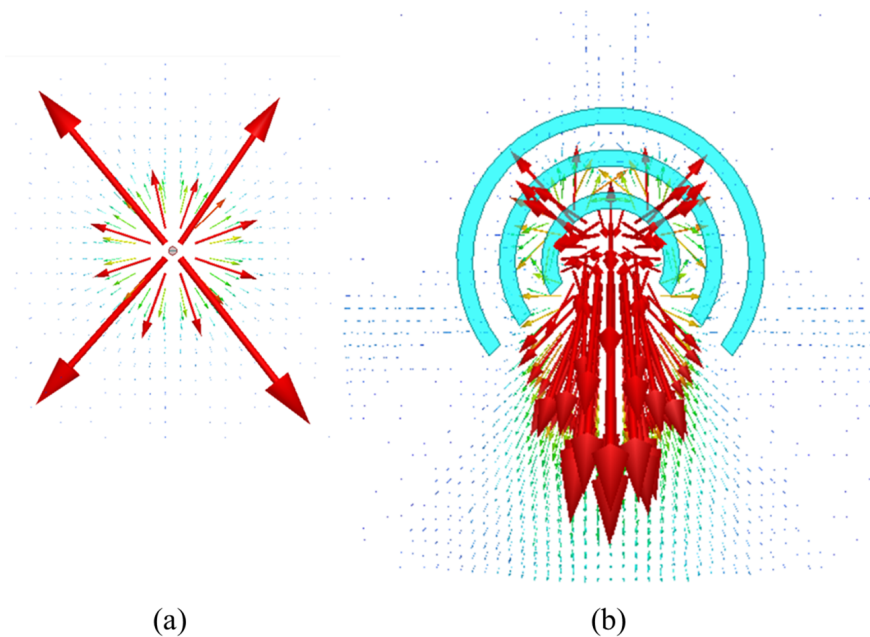


Figura 4.2: Análise, para a frequência de 5,7GHz, do vetor de Poynting (a) no dipolo de meia onda com operação em 5,7GHz e (b) no refletor dielétrico quase cilíndrico operando juntamente com a antena para aprimoramento de diretividade.

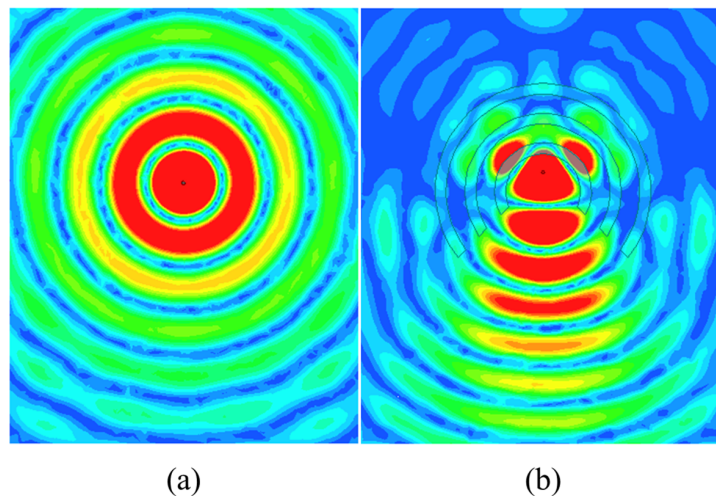


Figura 4.3: Magnitude do campo elétrico para análise do direcionamento da energia pela estrutura semi-cilíndrica dielétrica. Análise para operação em 5,7GHz nas condições: (a) apenas a antena dipolo e (b) comportamento mais diretivo obtido pelos efeitos dos refletores de Bragg sobre a antena dipolo.

de ganho em dBi, a Figura 4.5 mostra o comportamento geral das características da irradiação. É possível perceber claramente o direcionamento do feixe irradiado a partir da atuação da estrutura de Bragg (Figura 4.5b). O estudo para uma das faixas de frequências IEEE802.11 foi feito em 5,7 GHz, frequência de melhor casamento de impedâncias para o dipolo de meia onda operando sem nenhuma influência das camadas refletoras, como apresentado na Figura 4.1 em vermelho pontilhado. Este irradiador apresentou 2,79 dBi de ganho (Figura 4.5(a)). Sob influência dos refletores, o ganho

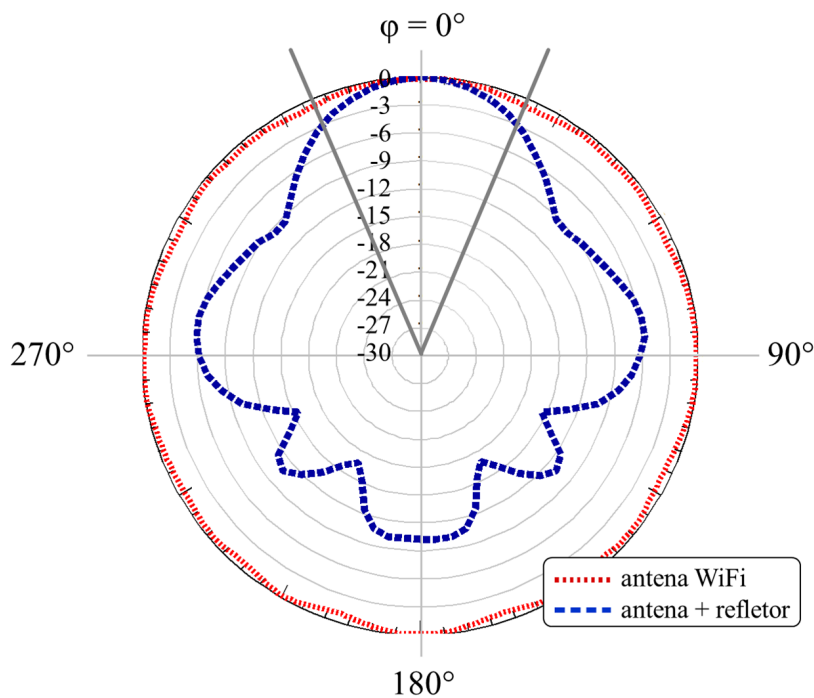


Figura 4.4: Diagrama de irradiação em 5,7 GHz normalizado, para a estrutura de Bragg posicionada ao redor da antena dipolo (curva azul tracejada) e a antena sem os efeitos de Bragg (curva vermelha pontilhada) para $0^\circ < \phi < 360^\circ$.

foi melhorado para 11,09 dBi (Figura 4.5(b)) após as inúmeras reflexões provocadas pela estrutura de Bragg.

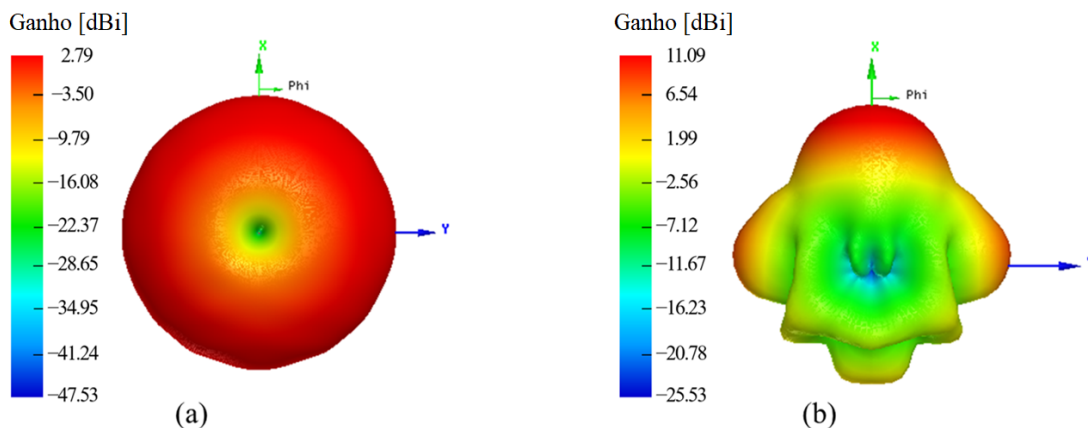


Figura 4.5: Diagrama de irradiação tridimensional, na frequência de operação de 5,7 GHz, de uma antena dipolo de meia onda como as que compõem um AP (a) sem qualquer dispositivo para melhoramento de ganho e (b) com a estrutura de Bragg projetada para reflexão dos comprimentos de onda de operação da antena.

Verificou-se pela comparação das variações de ganhos com relação às suas frequências feita na Figura 4.6 que a atuação do refletor (curva em azul) proporcionou ganho superior ao originalmente apresentado pela antena (curva em vermelho) em toda a faixa de frequências de análise, entre 5 GHz e 6 GHz.

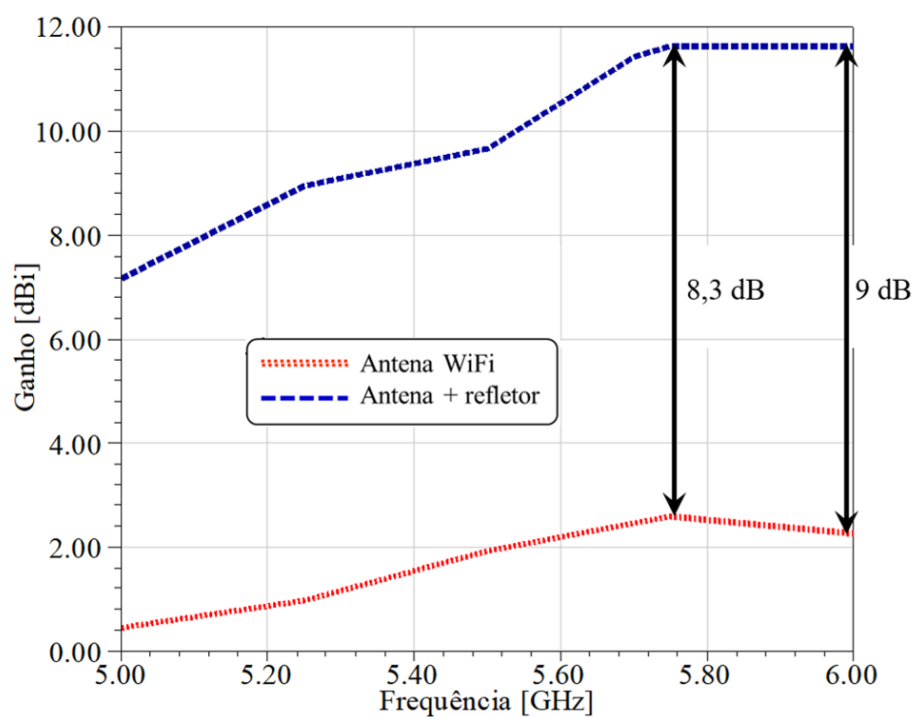


Figura 4.6: Ganho, em dBi, com relação a frequência, em GHz, da antena dipolo apenas, representada pela curva em vermelho pontilhada, e com a estrutura de Bragg posicionada em torno da antena, representada pela curva em azul tracejada. Análise realizada em 5,7 GHz, frequência de operação do WiFi.

Capítulo 5

Caracterização experimental

PROJETADA para frequência de operação em 5,7 GHz, a estrutura proposta possui tamanho igual a $1,5\lambda_o \times 2,5\lambda_o$ (altura \times largura), com formato e dimensões que garantem sua união facilmente a um AP. Com o objetivo de validar os resultados obtidos numericamente, ela foi fabricada e caracterizada experimentalmente. Os refletores fabricados com filamentos de PLA ($\epsilon_{\text{PLA}} = 2,9$) para impressora 3D possuem as especificações da Seção 3.2, ou seja, a abertura cônica possui $a = 2,25\lambda_o$ e as camadas apresentam espessuras $d_{\text{ar}} = 13$ mm e $d_{\text{PLA}} = 8$ mm. A impressão em 3D foi feita com a colaboração do Fab Lab Inatel, utilizando uma impressora CL2 Pro Plus da empresa Cliever (Brasil), com filamentos de PLA desenvolvidos e comercializados pela mesma empresa. Esses filamentos são desenvolvidos com PLA Ingeo™ 4043D da empresa NatureWorks (Estados Unidos). O PLA é um polímero biodegradável proveniente de fontes renováveis, com características que motivam sua ampla utilização para impressão em 3D, tais como detalhes precisos e menos empenamento ou ondulação, bem como boa resistência ao impacto nas peças impressas [64]. O tempo total de impressão foi de 51 horas.

Um dipolo de meia onda com braços de 5,5 mm é responsável pela excitação do sistema irradiante, cujo campo é direcionado pelo refletor dielétrico projetado. A Figura 5.1 mostra a estrutura de Bragg quase cilíndrica impressa em 3D ao lado do dipolo (Figura 5.1(a)) e posicionada ao redor do irradiador (Figura 5.1(b)) de modo que este esteja centralizado e espaçado de $1/4$ do comprimento de onda de operação (λ_o) do primeiro espelho (menor camada da estrutura), como mostrado na Seção 3.2.

5.1 Metodologia de testes

A caracterização experimental foi realizada no laboratório WOCA (*Wireless and Optical Convergent Access*) do INATEL. A Figura 5.2 mostra a montagem para a medição do coeficiente de reflexão com o dipolo de meia onda associado à estrutura dielétrica proposta. Utilizou-se o analisador de rede vetorial PNA *Network Analyzer* N5224A da Keysight, com capacidade de analisar frequências de 100 MHz a 43,5 GHz. Na Figura 5.3 tem-se o cenário com a configuração utilizada para as medidas do diagrama de irradiação. Para esta caracterização, empregou-se no lado da transmissão um gerador de sinal analógico Keysight modelo EXG N5172B, o qual fornece uma saída

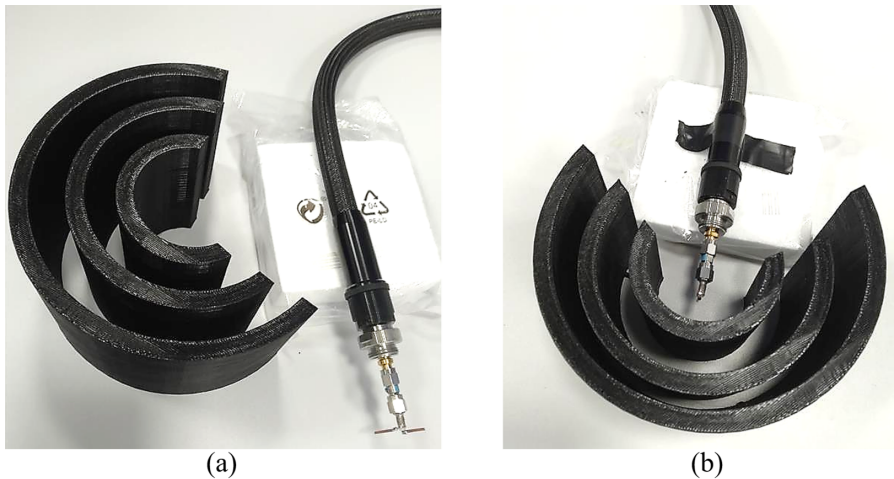


Figura 5.1: Fotografias da Estrutura de Bragg quase cilíndrica fabricada na impressora 3D para caracterização experimental associada ao dipolo de meia onda.

estável de 9 kHz a 6 GHz, e uma antena log-periódica Aaronia AG modelo HyperLOG 60100 como referência com 5 dBi de ganho. No lado da recepção, tem-se um analisador de espectros FieldFox N9952A da Keysight, o qual garante medidas confiáveis para recepções até 50 GHz, e o conjunto composto pela estrutura de Bragg proposta e o dipolo. As antenas de transmissão e de recepção foram posicionados na mesma altura, a 1,5 m acima do piso, valor muito maior do que o comprimento de onda irradiado $\lambda_0 = 52$ mm, e a distância entre elas é superior ao início da região de campo distante. Utilizou-se potência de transmissão muito baixa para mitigar reflexões, uma vez que os experimentos foram feitos em um ambiente real, não em uma câmara anecoica. O diagrama de irradiação é medido variando-se controladamente o conjunto fixado em uma base dielétrica (Figura 5.3(c)) em azimute para garantir máxima potência recebida.

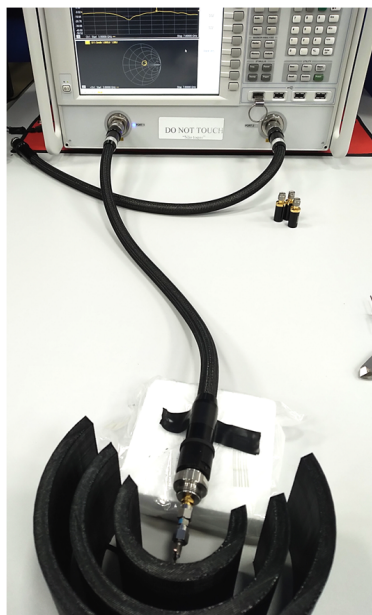


Figura 5.2: Montagem utilizada para mensurar o coeficiente de reflexão na faixa de frequências de análise, de 5 até 6,5 GHz

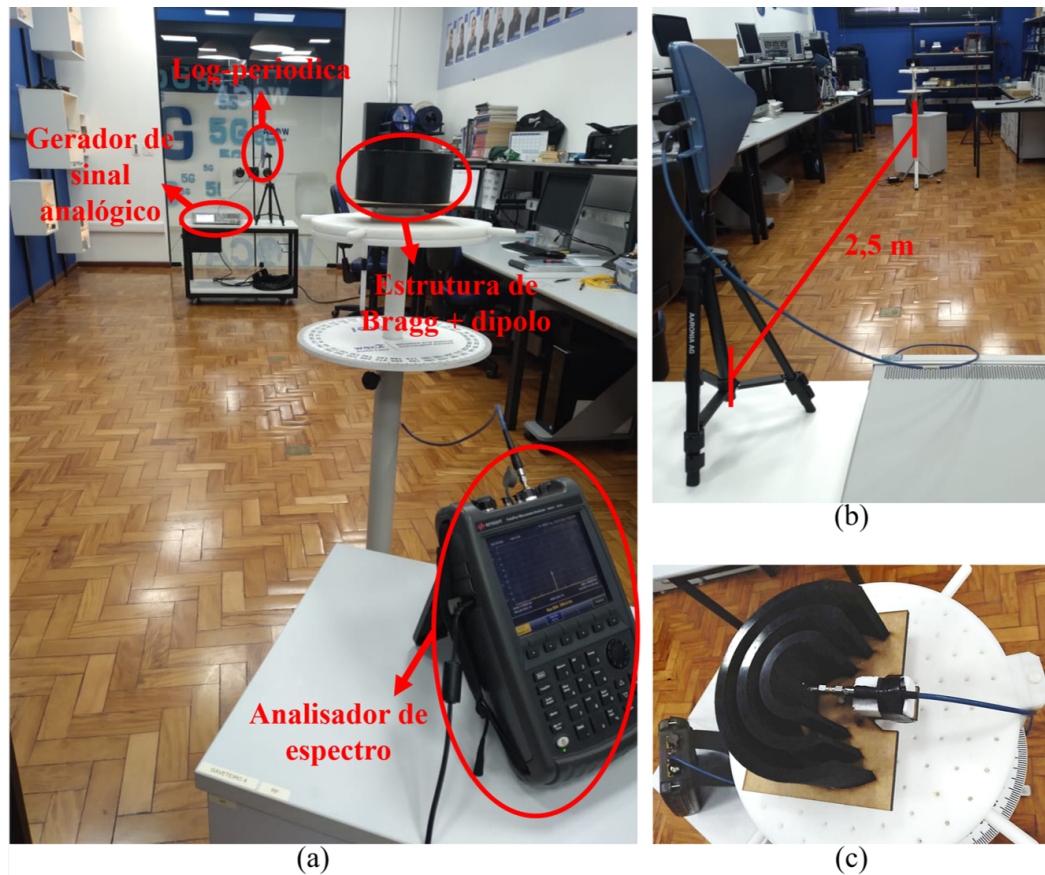


Figura 5.3: Fotografias do levantamento experimental das características da estrutura proposta. Montagens utilizadas para mensurar o diagrama de irradiação em 5,7 GHz em azimute, plano perpendicular ao eixo do dipolo com polarização vertical. Vistas a partir (a) da recepção e (b) da transmissão. (c) Conjunto (irradiador e refletor Bragg) fixado em uma base dielétrica.

5.2 Resultados experimentais

Na Figura 5.4 reproduzem-se os coeficientes de reflexão obtidos com a simulação e com a medição. Estes são comparados com o coeficiente de reflexão simulado de uma antena dipolo de meia onda na frequência do projeto, curva vermelha. Os resultados mostraram-se satisfatórios, pois o sistema permaneceu casado em toda a banda de operação do dipolo, definida para coeficiente de reflexão inferior a -10 dB, e com melhor adaptação de impedância em torno de 5,7 GHz. Na comparação com o coeficiente de reflexão simulado, observa-se casamento de impedâncias localizado a partir 5 GHz e uma diferença de 35 dB no ponto de melhor adaptação (5,7 GHz). Essa diferença pode ser justificada por efeitos reais não considerados nas simulações numéricas e imperfeições na impressão, resultando em pequenos desalinhamentos no comprimento do período da estrutura de Bragg.

Para a caracterização do diagrama de irradiação, o sistema irradiante foi fixado em uma base de material dielétrico como visto na Figura 5.3(c). Mensurou-se os níveis de ganho para o sistema polarizado verticalmente obtendo para $0 < \phi < 360^\circ$ o diagrama de irradiação normalizado na forma polar da Figura 5.5, a qual compara os di-

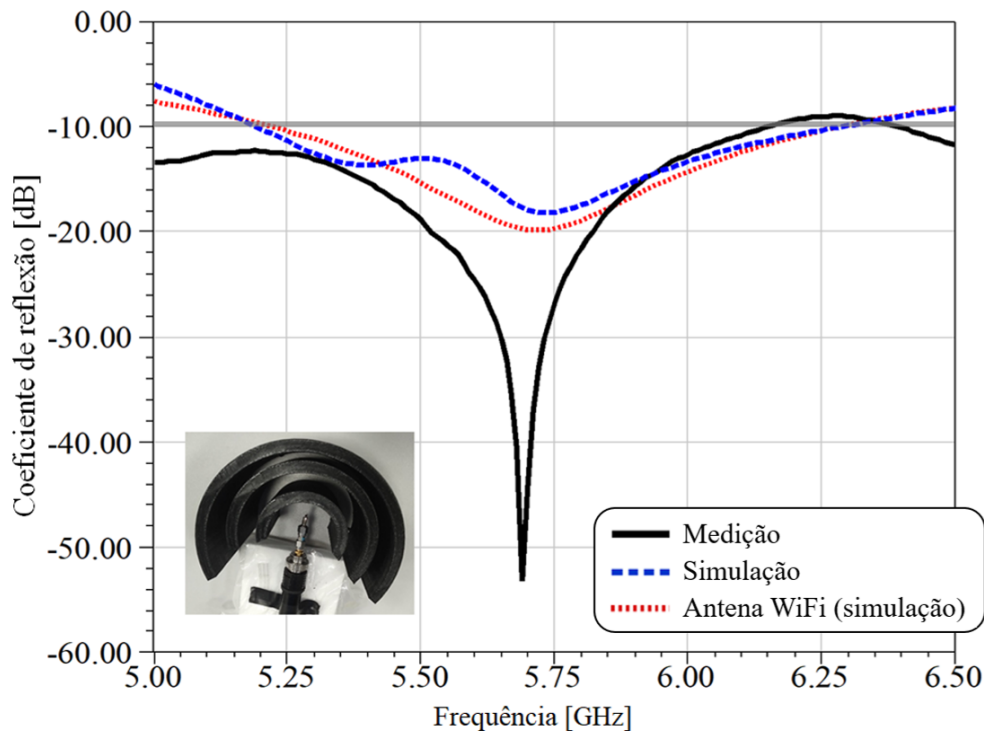


Figura 5.4: Comparação entre os coeficientes de reflexão com influência da estrutura de refletores de Bragg simulado e medido.

agramas simulado e medido apresentando ótima concordância. Diferente do diagrama onidirecional no plano do campo magnético do dipolo operando isoladamente, houve formação de um lobo principal bem definido, com HPBW igual a 50° , demonstrando os efeitos do refletor projetado. Na direção de máxima irradiação, obteve-se um sinal recebido com ganho igual a 9,8 dBi com a presença da estrutura dielétrica. Isso significa que houve um aumento de aproximadamente 7 dB com relação à emissão do dipolo com ganho de 2,79 dBi calculado na simulação na direção de máxima irradiação. Portanto, observa-se um ganho superior a 400% ao produzido pelo dipolo de excitação atuando de forma isolada.

A tabela 5.1 faz uma comparação do desempenho do refletor de Bragg quase cilíndrico proposto neste trabalho em termos de ganho obtido, tamanho e características de produção com as estruturas para modificação da irradiação WiFi em [49–53]. Estes refletores possuem ganhos e dimensões aproximadas e são constituídos de material condutor em parte ou em toda a sua estrutura. Em contrapartida, o refletor de Bragg proposto é construído apenas com material dielétrico, proporcionando mínimas perdas causadas pelo material condutor. Ele apresentou desempenho semelhante em termos de melhora no ganho, porém com menores dimensões, quando comparado aos outros refletores encontrados na literatura. Sua fabricação é apenas a impressão em 3D das bicamadas em PLA alternadas com ar, garantindo uma estrutura leve para fácil adaptação ao AP.

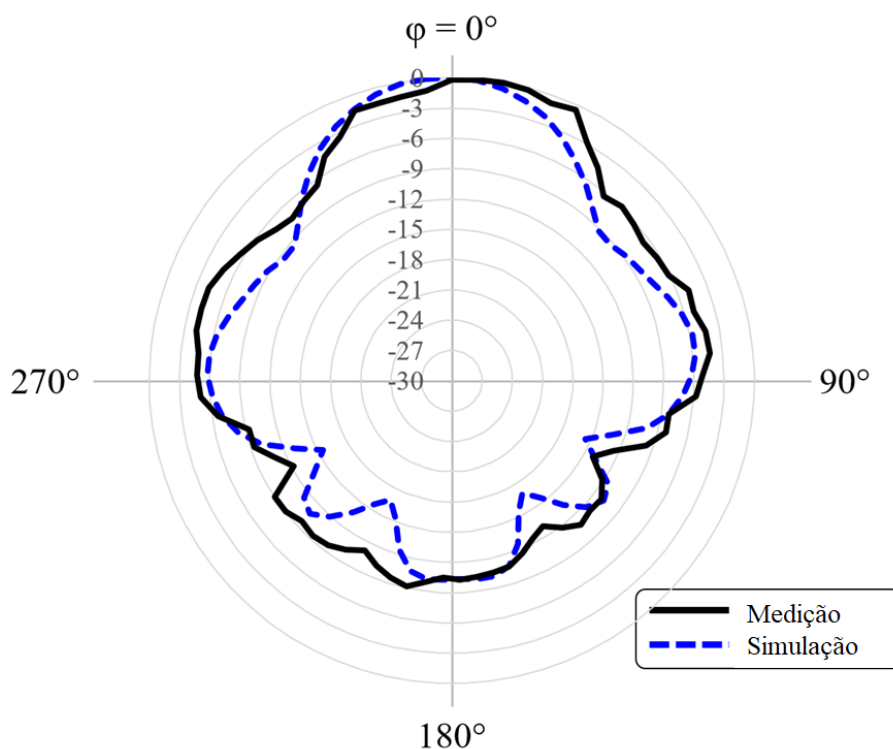


Figura 5.5: Medição (curva preta) e simulação (curva azul tracejada) dos diagramas de irradiação em coordenadas polares normalizados em azimute ($0^\circ < \phi < 360^\circ$) na frequência de 5,7 GHz, com o refletor dielétrico quase cilíndrico em atuação ao redor da antena.

Tabela 5.1: Comparação do desempenho do refletor proposto com outras estruturas encontradas na literatura.

Referência	Irradiação		Fabricação	
	Frequência WiFi	Melhora no ganho	Tamanho	Protótipo
[49]	5,5 GHz	10 dB	$\lambda \times 1.21\lambda$ (cada arranjo)	Refletor de canto com FSS
[50]	5,8 GHz	9 dB	$1.16\lambda \times 1.74\lambda$ (cada arranjo)	Refletor de canto com FSS
[51]	2,4 GHz	10 dB	$1.2\lambda \times 3.2\lambda$	Refletor parabólico com alumínio e madeira
[52]	2,4 GHz ou 5 GHz	não informou	Diferentes modelos	Impresso em 3D e coberto por metal
[53]	2,4 GHz	6 dB	Diferentes modelos, de acordo com o sinal	Impresso em 3D e coberto por metal
Estrutura proposta	5,7 GHz	9 dB	$1.5\lambda \times 2.5\lambda$	Todo dielétrico (ar e PLA) impresso em 3D

Capítulo 6

Conclusões e propostas para novas pesquisas

Foram propostos neste estudo, o projeto e a caracterização de uma estrutura dielétrica desenvolvida utilizando as características de alta refletividade dos espelhos de Bragg. Sua geometria baseia-se no diagrama de irradiação onidirecional no plano do campo magnético dos dipolos de meia onda, pois a sua propagação perpendicularmente ao seu eixo é praticamente igual em todas as direções, oferecendo cobertura para regiões onde esta não é necessária. Demonstra-se numericamente e experimentalmente através da fabricação de um refletor de Bragg quase cilíndrico, com uma abertura central triangular, tendo em vista o aumento de ganho e diretividade de antenas de ondas cm e mm prontamente disponíveis. Em particular, as presentes nos APs das WLANs, aqui operando na frequência central $f = 5,7$ GHz evidenciam o princípio de funcionamento da proposta, que pode ser estendido para regimes de frequência superior e inferior. Significativamente, foi desenvolvida apenas uma multicamada composta por três bicamadas com forma quase cilíndrica, que com a popularidade da tecnologia de impressão 3D, podem ser facilmente fabricadas. Outros formatos também podem ser explorados, como por exemplo, um ajuste deste modelo para operar em conjunto com APs que possuem mais de uma antena.

A estrutura proposta nessa dissertação mostrou-se um refletor eficiente com relação à adaptação do diagrama de irradiação produzido por uma antena dipolo de meia onda, reduzindo a abertura de feixe do lobo principal, com maior diretividade na irradiação. O estreitamento do lobo principal pode indicar efeitos de isolamento eletromagnético entre este e a irradiação de dispositivos próximos. Além disso, obteve-se diretividade em uma antena onidirecional já presente no sistema WiFi sem a necessidade do projeto de uma nova antena. Demonstrou-se aprimoramentos de diretividade acompanhados por aprimoramentos de ganho de mais de 400% em relação ao ganho da antena sem a estrutura de Bragg.

Referências Bibliográficas

- [1] W. Roh, J.-Y. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, K. Cheun, and F. Aryanfar, “Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106–113, 2014.
- [2] S. S. Ahmed, A. Genghammer, A. Schiessl, and L.-P. Schmidt, “Fully electronic e-band personnel imager of 2 m² aperture based on a multistatic architecture,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 1, pp. 651–657, 2013.
- [3] Z. H. Jiang, Y. Zhang, J. Xu, Y. Yu, and W. Hong, “Integrated broadband circularly polarized multibeam antennas using berry-phase transmit-arrays for Ka-band applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 2, pp. 859–872, 2020.
- [4] S. Kim, A. Rida, V. Lakafosis, S. Nikolaou, and M. Tentzeris, “77-GHz mmwave antenna array on liquid crystal polymer for automotive radar and RF front-end module,” *Etri Journal*, vol. 41, pp. 262–269, 2019.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2005.
- [6] Y. Zhang, R. Mittra, and W. Hong, “On the synthesis of a flat lens using a wideband low-reflection gradient-index metamaterial,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 25, no. 16, pp. 2178–2187, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1163/156939311798147015>
- [7] A. Dhouibi, S. N. Burokur, and A. de Lustrac, “Planar metamaterial-based beam-scanning broadband microwave antenna,” *Journal of Applied Physics*, vol. 115, no. 19, p. 194901, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4876233>
- [8] J. H. Kim, C.-H. Ahn, and J.-K. Bang, “Antenna gain enhancement using a holey superstrate,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 3, pp. 1164–1167, 2016.
- [9] Q. L. Li, S. W. Cheung, D. Wu, and T. I. Yuk, “Microwave lens using periodic dielectric sheets for antenna-gain enhancement,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 4, pp. 2068–2073, 2017.
- [10] Y.-X. Zhang, Y.-C. Jiao, and S.-B. Liu, “3-D-printed comb mushroom-like dielectric lens for stable gain enhancement of printed log-periodic dipole array,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 11, pp. 2099–2103, 2018.

- [11] A. Belen, F. Güneş, P. Mahouti, and M. Palandöken, “A novel design of high performance multilayered cylindrical dielectric lens antenna using 3D printing technology,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 1, p. e21988, 2020. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mmce.21988>
- [12] C. Pfeiffer and A. Grbic, “A printed, broadband luneburg lens antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 9, pp. 3055–3059, 2010.
- [13] H. Zhu, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, “Enhancing antenna boresight gain using a small metasurface lens: Reduction in half-power beamwidth,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 35–44, 2016.
- [14] W. [Zhengbin, W. Haofang, D. Zhuangli, W. Zhihang, Z. Yerong, and Z. Zhipeng, “Low-profile microwave lens antenna based on isotropic huygens metasurfaces,” *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, vol. 24, no. 4, pp. 10–15, 2017.
- [15] S. O. Yakushev, O. V. Shulika, S. I. Petrov, and I. A. Sukhoivanov, “Chirp compression with single chirped mirrors and its assembly,” *Microelectron. J.*, vol. 39, no. 3–4, p. 690–695, Mar. 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.07.056>
- [16] S. Iakushev, O. Shulika, V. Lysak, and I. Sukhoivanov, “Air-gap silicon nitride chirped mirror for few-cycle pulse compression,” *OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS – RAPID COMMUNICATIONS*, vol. 2, pp. 686 – 688, 09 2008.
- [17] A. Vahdati and F. Parandin, “Antenna patch design using a photonic crystal substrate at a frequency of 1.6 THz,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 109, pp. 2213–2219, 2019.
- [18] A. Yariv and P. Yeh, “Wave propagation in periodic media,” *Photonics: Optical electronics in modern communications*, pp. 539–601, 2007.
- [19] S. F. Busch, E. Castro-Camus, F. Beltran-Mejia, J. C. Balzer, and M. Koch, “3D Printed Prisms with Tunable Dispersion for the THz Frequency Range,” *Journal of Infrared*, vol. 39, no. 6, pp. 553–560, Jun. 2018.
- [20] P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, ser. Wiley Series in Pure and Applied Optics. Wiley, 2005. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=-yZBAQAIAAJ>
- [21] Q. Li, S. Cheung, D. Wu, and T. Yuk, “Microwave lens using periodic dielectric sheets for antenna-gain enhancement,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 4, pp. 2068–2073, 2017.
- [22] Y. Zhang, Y. Jiao, and S. Liu, “3-D-printed comb mushroom-like dielectric lens for stable gain enhancement of printed log-periodic dipole array,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 11, pp. 2099–2103, 2018.
- [23] Y. Zhang and Y. Jiao, “3D-printed lens-antennas with broadband stable radiation performance for 5G communication,” in *2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2019, pp. 1–3.
- [24] J. Wen, Y.-C. Jiao, Y.-X. Zhang, Z. Weng, and C. Zhang, “Low-cost and easy

- manufactured dielectric rod antennas based on 3D printing technology,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 12, p. e21954, 2019.
- [25] A. Belen, F. Güneş, P. Mahouti, and M. Palandöken, “A novel design of high performance multilayered cylindrical dielectric lens antenna using 3D printing technology,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 1, p. e21988, 2020.
- [26] A. A. Baba, R. M. Hashmi, and K. P. Esselle, “A simple electromagnetic bandgap resonator antenna for 60 GHz wireless applications,” in *2016 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, 2016, pp. 1–2.
- [27] M. Thevenot, C. Cheype, A. Reineix, and B. Jecko, “Directive photonic-bandgap antennas,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2115–2122, 1999.
- [28] N. Nguyen-Trong, H. H. Tran, T. K. Nguyen, and A. M. Abbosh, “Wideband Fabry-Perot antennas employing multilayer of closely spaced thin dielectric slabs,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 1354–1358, July 2018.
- [29] N. Wang, J. Li, G. Wei, L. Talbi, Q. Zeng, and J. Xu, “Wideband Fabry-Perot resonator antenna with two layers of dielectric superstrates,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 229–232, 2015.
- [30] R. K. Chaudhary, G. K. Singh, K. V. Srivastava, and A. Biswas, “Coaxial fed half-split multilayer cylindrical dielectric resonator antenna for wideband applications,” in *2011 41st European Microwave Conference*, 2011, pp. 1015–1018.
- [31] S. Fakhte, H. Oraizi, L. Matekovits, and G. Dassano, “Cylindrical anisotropic dielectric resonator antenna with improved gain,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 3, pp. 1404–1409, 2017.
- [32] J. Krupka, A. Cwikla, M. Mrozowski, R. Clarke, and M. Tobar, “High Q-factor microwave Fabry-Perot resonator with distributed Bragg reflectors,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 52, no. 9, pp. 1443–1451, 2005.
- [33] S. J. Bale, P. D. Deshpande, M. Hough, S. J. Porter, and J. K. A. Everard, “High-Q tuneable 10-GHz Bragg resonator for oscillator applications,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, no. 2, pp. 281–291, 2018.
- [34] J. A. Pinto Ribeiro, E. Gonçalves, J. A. Justino Ribeiro, and F. Beltran-Mejia, “Radiation pattern design by using 3D printed Bragg structures,” in *2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2019, pp. 1287–1290.
- [35] K. Abdelmoumen, S. Ahyoud, A. Asselman, and A. Faize, “Design of high gain ultra wide-band antenna for wireless communication using EBG structures,” vol. 9, pp. 1857–7881, 11 2013.
- [36] T. Aziz, M. R. Abd Razak, and N. E. A. Ghani, “The performance of different

- IEEE802.11 security protocol standard on 2.4GHz and 5GHz WLAN networks,” in *2017 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)*, 2017, pp. 1–7.
- [37] E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, and M. Gidlund, “Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 4724–4734, 2018.
- [38] B. Zhang, Y.-X. Guo, H. Zirath, and Y. P. Zhang, “Investigation on 3-D-printing technologies for millimeter-wave and terahertz applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 4, pp. 723–736, 2017.
- [39] M. Liang, J. Wu, X. Yu, and H. Xin, “3D printing technology for RF and THz antennas,” in *2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2016, pp. 536–537.
- [40] J. Bjorgaard, M. Hoyack, E. Huber, M. Mirzaee, Y.-H. Chang, and S. Noghianian, “Design and fabrication of antennas using 3D printing,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 84, pp. 119–134, 2018.
- [41] IEEE Xplore, “Browse standards: Get program: Get 802(r) standards,” accessed: 2019-10-30. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/get-program/page/series?id=68>
- [42] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std. 802.11, 1997.
- [43] J. D. Kraus, *Antennas*, 2nd ed. New York, NY: McGraw-Hill Inc., 1988.
- [44] Ansys hfss. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- [45] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2015.
- [46] L. Subrt and P. Pechac, “Controlling propagation environments using intelligent walls,” in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EU-CAP)*, 2012, pp. 1–5.
- [47] M. Dupre, N. Kaina, G. Lerosey, and M. Fink, “Recycling radio waves with smart walls,” in *International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, 2015.
- [48] S. Han and K. G. Shin, “Enhancing wireless performance using reflectors,” in *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, 2017, pp. 1–9.
- [49] A. Chatterjee and S. K. Parui, “Performance enhancement of a dual-band monopole antenna by using a frequency-selective surface-based corner reflector,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2165–2171, 2016.
- [50] G. H. Elzwawi, A. Kesavan, R. Alwahishi, and T. A. Denidni, “A new corner-reflector antenna with tunable gain based on active frequency selective surfaces,” *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 1, pp. 88–94, 2020.
- [51] D. Li, “A novel and versatile parabolic reflector that significantly improves Wi-Fi reception at different distances and angles,” *Journal of Wireless Networking and Communications*, vol. 3, no. 2, pp. 13–17, 2013.

- [52] J. Chan, C. Zheng, and X. Zhou, “Poster: 3D printing your wireless coverage,” *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2015.
- [53] X. Xiong, J. Chan, E. Yu, N. Kumari, A. A. Sani, C. Zheng, and X. Zhou, “Customizing indoor wireless coverage via 3D-fabricated reflectors,” in *Proceedings of the 4th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments*, ser. BuildSys '17. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3137133.3137148>
- [54] M. Born, E. Wolf, A. B. Bhatia, P. C. Clemmow, D. Gabor, A. R. Stokes, A. M. Taylor, P. A. Wayman, and W. L. Wilcock, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th ed. Cambridge University Press, 1999.
- [55] E. Hecht, “Optics, 4th edition,” *Addison-Wesley, San Francisco*, vol. 2, p. 3, 2002.
- [56] J. A. J. Ribeiro, *Comunicações Ópticas*, 3rd ed. São Paulo, SP: Érica, 2007.
- [57] C. G. Barkla, “The nature of X-rays,” *Nature*, vol. 76, no. 1983, pp. 661–662, 1907.
- [58] W. H. Bragg and W. L. Bragg, “The reflection of X-rays by crystals,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 88, no. 605, pp. 428–438, 1913.
- [59] W. L. Bragg, “The specular reflection of X-rays.” *Nature*, vol. 90, no. 2250, pp. 410–410, 1912.
- [60] W. H. Bragg, “X-rays and crystals,” *Nature*, vol. 90, no. 2243, pp. 219–219, 1912.
- [61] J. A. J. Ribeiro, *Propagação de Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações*, 2nd ed. São Paulo, SP: Érica, 2008.
- [62] J. D. Kraus, *Electromagnetics*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1992.
- [63] P. I. Deffenbaugh, R. C. Rumpf, and K. H. Church, “Broadband microwave frequency characterization of 3-D printed materials,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 12, pp. 2147–2155, 2013.
- [64] Ingeo Biopolymer 4043D Technical Data Sheet - Biaxially Oriented Films – General Purpose. [Online]. Available: https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_films_pdf.pdf.

