



Universidade Federal
de Campina Grande

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

Emprego de Antena Reconfigurável para Comunicações entre Veículos

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2020

Felipe César Maia e Silva

**Emprego de Antena Reconfigurável para Comunicações
entre Veículos**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador: Raquel Aline Araújo Rodrigues Felix, D.Sc.

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2020

Felipe César Maia e Silva

Emprego de Antena Reconfigurável para Comunicações entre Veículos

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica

Trabalho aprovado. Campina Grande, Paraíba, 30 de outubro de 2020:

Raquel Aline Araújo Rodrigues Felix,
D.Sc.
Orientador(a)

Glauco Fontgalland, PhD
Avaliador

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2020

*Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos
que sempre acreditaram e possibilitaram a realização desse sonho.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à DEUS por ter possibilitado todas as oportunidades e me fazer ter esperança em um futuro melhor.

Aos MEUS PAIS por todo o esforço, carinho e conselhos nessa trajetória que me fez tornar a pessoa que sou hoje.

Aos MEUS IRMÃOS por serem grandes companheiros de vitórias e derrotas, de alegrias e tristezas. Sempre me apoiando e dando forças para seguir caminhando.

Agradeço à professora Raquel pela paciência e apoio prestado durante todo o trabalho.

Aos meus amigos, por mesmo estando longe, sempre estarem presentes.

Aos colegas de graduação por todo o apoio compartilhado ao longo desses anos.

*“Não vos preocupeis, pois, com o dia de amanhã:
o dia de amanhã terá as suas preocupações próprias.
A cada dia basta o seu cuidado.”
Mateus 6, 34.*

Resumo

A incorporação das tecnologias de comunicação nos veículos modernos está viabilizando uma nova geração de automóveis conectados. A comunicação entre veículos tem se mostrado um modelo audacioso para desenvolvimento e implantação nos chamados Sistemas de Transporte Inteligentes. Com essa capacidade de comunicação, eles poderão: tornar o trânsito mais seguro para os motoristas; melhorar a mobilidade urbana e diminuir as emissões de gás carbônico na atmosfera. Esse trabalho propõe o projeto de uma antena com diagrama de irradiação reconfigurável para substituir os tradicionais sistemas de múltiplas antenas para aplicação na comunicação entre veículos, como também uma perspectiva das tecnologias futuras para esse tipo de comunicação. Os resultados foram avaliados por meio de modelagem matemática e simulação computacional, utilizando como medidas de desempenho o coeficiente de reflexão e diagrama de irradiação da antena. Os resultados indicaram que é possível obter diferentes diagramas de irradiação e continuar na mesma frequência de atuação estabelecida para comunicações entre veículos.

Palavras-chave: Antena Reconfigurável. Comunicação entre Veículos. Sistemas de Comunicação.

Abstract

An incorporation of communication technologies in modern vehicles is enabling a new generation of connected people. Communication between vehicles has a model audacious for development and implantation in the so-called Intelligent Transport Systems. With this ability to communication, they can: make traffic safer for drivers; improve urban mobility and decrease carbon dioxide relief in the atmosphere. This work proposes the design of an antenna with reconfigurable irradiation diagram to replace traditional multiple antenna systems for application in vehicle communication, as well as a perspective of future technologies for this type of communication. The results were obtained by mathematical modeling and computational simulation, using performance the reflection coefficient and antenna irradiation diagram. The results indicated that it is possible to obtain different irradiation diagrams and continue at the same frequency of occurrence for communications between vehicles.

Keywords: Communication Systems. Reconfigurable Antenna. Vehicle Communication.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Propagação de uma onda eletromagnética.	20
Figura 2 – Diagrama de funcionamento de uma antena.	21
Figura 3 – Diagrama de irradiação.	22
Figura 4 – Estados de polarização de uma onda.	23
Figura 5 – Terminais de entrada de uma antena.	24
Figura 6 – Circuito equivalente de uma antena transmissora.	24
Figura 7 – Antena dipolo.	26
Figura 8 – Diagrama de irradiação de um dipolo.	28
Figura 9 – Antena de microfita.	29
Figura 10 – Diversos formatos de <i>patches</i>	29
Figura 11 – Arranjo de dois dipolos infinitesimal.	31
Figura 12 – Parâmetros S	33
Figura 13 – Indutor	35
Figura 14 – Curva característica de um diodo PIN	35
Figura 15 – Circuito equivalente do diodo PIN.	36
Figura 16 – Interface gráfica do CST	37
Figura 17 – Alimentação por linha de microfita	38
Figura 18 – Plano terra truncado utilizado na antena.	41
Figura 19 – Estrutura da antena e condições de contorno no CST.	42
Figura 20 – Antena desenvolvida	43
Figura 21 – Diodo SMD.	43
Figura 22 – Circuito equivalente do diodo (a) estado On (b) estado Off.	44
Figura 23 – Antena desenvolvida	45
Figura 24 – Configuração dos diodos	46
Figura 25 – Coeficiente de reflexão para o estado ON/OFF.	46
Figura 26 – Diagrama de irradiação para os planos E e H.	47
Figura 27 – Diagrama de irradiação 3D.	47
Figura 28 – Configuração dos diodos	48
Figura 29 – Coeficiente de reflexão para o estado OFF/ON.	48
Figura 30 – Diagrama de irradiação para os planos E e H em 2D.	49
Figura 31 – Diagrama de irradiação em 3D.	49
Figura 32 – Configuração dos diodos	50
Figura 33 – Coeficiente de reflexão para o estado OFF/OFF.	50
Figura 34 – Diagrama de irradiação para os planos E e H.	51
Figura 35 – Diagrama de irradiação em 3D.	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros fundamentais da antena.	39
Tabela 2 – Impedância de entrada da linha e permissividade efetiva	39
Tabela 3 – Constantes para estimativa das dimensões do <i>patch</i>	40
Tabela 4 – Circuito equivalente do diodo	44

Lista de abreviaturas e siglas

NHTSA	Agência de Segurança Rodoviária Americana
V2V	Comunicações entre Veículos
DC	Corrente Contínua
FA	Fator de Arranjo
IoT	Internet das Coisas
RF	Radiofrequência
FIT	Técnica de Integração Finita

Lista de símbolos

h	Altura do Substrato
\vec{E}	Campo Elétrico
\vec{H}	Campo Magnético
C_p	Capacitância em Paralelo do Modelo Equivalente do Diodo
\vec{J}	Corrente de Deslocamento
β	Constante de Fase
λ	Comprimento de Onda
l	Comprimento do Dipolo
I_o	Corrente no Dipolo
Γ	Coefficiente de Reflexão
T	Coefficiente de Transmissão
\vec{B}	Densidade de Fluxo Magnético
\vec{D}	Densidade de Fluxo Elétrico
ρ_v	Densidade Volumétrica de Carga
ϕ	Deslocamento de Fase
D	Diretividade
r	Distância de um Ponto até o Dipolo
η_{rad}	Eficiência
α	Fator de Atenuação
f_r	Frequência de Ressonância
G	Ganho
L	Indutor
L_s	Indutância em Série do Modelo Equivalente do Diodo

L_{on}	Indutância do Circuito Equivalente do Diodo no Estado ON.
L_{off}	Indutância do Circuito Equivalente do Diodo no Estado OFF.
Z_a	Impedância de Entrada da Antena
Z_0	Impedância Característica da Linha
η	Impedância Intrínseca do Meio
Z_l	Impedância Característica da Linha
Z_c	Impedância Característica da Carga
U	Intensidade de Irradiação
V^-	Matriz de Tensões Refletidas
V^+	Matriz de Tensões Incidentes
S	Matriz de Espalhamento
k	Número de onda
ϵ	Permissividade Elétrica
ϵ_{ff}	Permissividade Efetiva
ϵ_r	Permissividade Relativa
P_{rad}	Potência Total Irradiada
P_{ent}	Potência nos Terminais de Entrada da Antena
\vec{A}	Potencial Magnético
μ	Permeabilidade Magnética
R_a	Resistência Vista nos Terminais de Entrada da Antena
X_a	Reatância Vista nos Terminais de Entrada da Antena
R_s	Resistência em Série do Modelo Equivalente do Diodo
R_p	Resistência em Paralelo do Modelo Equivalente do Diodo
R_{on}	Resistência do Circuito Equivalente do Diodo no Estado ON.
R_{off}	Resistência do Circuito Equivalente do Diodo no Estado OFF.
c_0	Velocidade da Luz no Espaço Livre

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivo	18
1.2.1	Objetivos Específicos	18
1.3	Organização do Trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Equações de Maxwell	20
2.2	Antenas	21
2.2.1	Parâmetros Fundamentais	22
2.2.1.1	Diagrama de Irradiação	22
2.2.1.2	Polarização	23
2.2.1.3	Impedância de Entrada	23
2.2.1.4	Diretividade	25
2.2.1.5	Ganho	25
2.2.1.6	Eficiência	25
2.2.2	Tipos de Antenas	25
2.2.2.1	Antenas Dipolo	26
2.2.2.2	Antenas Monopolo	28
2.2.2.3	Antenas de Microfita	29
2.2.2.4	Antenas Reconfiguráveis	30
2.3	Arranjos de Antenas	31
2.4	Parâmetros S	33
2.5	Componentes Eletrônicos	34
2.5.1	Indutor	34
2.5.2	Diodo PIN	35
2.6	Simulação Eletromagnética	36
3	ANTENAS RECONFIGURÁVEIS	38
3.1	Modelagem Matemática	38
3.1.1	Alimentação por Linha de Microfita	38
3.1.2	Patch	40
3.1.3	Plano terra truncado	40
3.2	Simulação Computacional	42
3.2.1	CST	42
3.2.2	Antena Planar	42

3.2.3	Chaveamento	43
3.2.4	Antena Reconfigurável	44
3.3	Resultados	45
3.3.1	Configuração ON/OFF	46
3.3.2	Configuração OFF/ON	48
3.3.3	Configuração OFF/OFF	49
4	CONCLUSÃO	52
4.1	Trabalhos futuros	52
5	REFERÊNCIAS	53

1 Introdução

Os avanços das tecnologias móveis e de transmissão sem fio tem possibilitado uma verdadeira transformação na composição e no modo das comunicações entre veículos (V2V). O que estamos vivenciando é o começo de uma revolução tecnológica chamada de Internet das Coisas (IoT), onde em diversas circunstâncias cotidianas, informações precisas podem facilitar nossa vida e principalmente auxiliar na segurança de milhões de usuários.

A incorporação das tecnologias de comunicação nos veículos modernos está viabilizando uma nova geração de automóveis conectados. Com essa capacidade de comunicação, eles poderão: (i) tornar o trânsito mais seguro para os motoristas; (ii) melhorar a mobilidade urbana (iii) diminuir as emissões de gás carbônico na atmosfera dentre outras.

A comunicação entre veículos (V2V) tem se mostrado um modelo audacioso para desenvolvimento e implantação nos chamados Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems*). Desde sua introdução há 10 anos, recebeu maior atenção nos últimos anos, com promessas de em um futuro próximo reduzir as taxas de mortalidade na estrada, melhorar a mobilidade urbana e diminuir as emissões de gás carbônico na atmosfera (MARANTIS *et al.*, 2017).

Essas tecnologias partem do princípio que utilizando uma rede V2V, cada veículo é capaz de perceber a presença de outros veículos. Desta forma, é possível enviar e receber informações em tempo real.

De maneira alternativa ao sistema convencional de comunicações, que geralmente emprega sistemas com múltiplas antenas em locais predefinidos, é proposto nesse trabalho uma abordagem com o emprego de uma antena reconfigurável.

Uma antena reconfigurável tem seu comportamento adaptado à alteração dos requisitos do sistema ou condições do meio, podendo prover níveis adicionais de funcionalidade ao sistema. O que permite uma redução de tamanho face a um sistema de múltiplas antenas, redução da complexidade e uma diminuição dos custos (COSTA, 2009).

1.1 Motivação

Vivemos em um mundo onde a tecnologia nos auxilia em diversas áreas do conhecimento e na vida cotidiana. Evidenciamos hoje o ato de dirigir, que afeta constantemente nossas vidas, a necessidade de dispor de uma tecnologia de informação para nos ajudar acerca da localização, dados de tráfego, rotas e outras informações que melhore a nossa segurança e mobilidade urbana.

Para a Agência de Segurança Rodoviária Americana (NHTSA), a tecnologia de comunicações entre veículos seria possível evitar cerca de 590 mil acidentes, salvando até mil vidas por ano, apenas nos Estados Unidos. Vale ressaltar, ainda, que a natureza da mobilidade veicular impõe uma série de novos desafios. Segundo Marantis (2019) os principais desafios são:

- Ambiente altamente dinâmico;
- Efeitos de dispersão de sinais;
- Interferências de sinais.

Considerando os desafios enfrentados no cenário descrito, esse trabalho propõe o projeto de uma antena com diagrama de irradiação reconfigurável atuando na frequência estabelecida pela FCC de 5,90 GHz para o uso em comunicações entre veículos.

1.2 Objetivo

Projetar uma antena com diagrama de irradiação reconfigurável para uso em comunicações entre veículos (V2V).

1.2.1 Objetivos Específicos

- Projetar uma antena reconfigurável que atenda todos os protocolos e requisitos impostos para a comunicação V2V.
- Avaliar e validar os resultados teóricos obtidos a partir de simulações em ambiente computacional.

1.3 Organização do Trabalho

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica acerca dos conteúdos que são abordados ao longo do texto.

No Capítulo 3 com o objetivo de avaliar o desenvolvimento da antena e sua aplicação na comunicação V2V é detalhada uma metodologia para obtenção dos resultados teóricos e simulados.

No Capítulo 4 é detalhada as perspectivas dos dispositivos e das comunicações V2V nas redes 5G e 6G.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

—

2 Fundamentação Teórica

2.1 Equações de Maxwell

Essencialmente as equações de Maxwell constituem o sistema de equações que regem o eletromagnetismo clássico, aplicado a todos os fenômenos eletromagnéticos. São elas, na forma diferencial, descritas por:

Lei de Faraday:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Lei de Ampère:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Lei de Gauss para o campo elétrico:

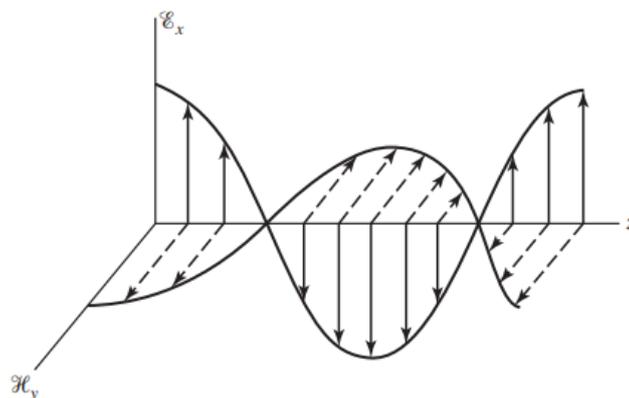
$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.3)$$

Lei de Gauss para o campo magnético:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

A primeira aplicação das equações de Maxwell é relativa à propagação de uma onda eletromagnética. Em geral, ondas eletromagnéticas são um meio de transportar energia ou informação. Em que elas compartilham três características principais: viajam em alta velocidade; ao se propagarem apresentam propriedades ondulatórias; são irradiadas a partir de uma fonte, sem a necessidade de um meio físico de propagação (SADIKU, 2000).

Figura 1 – Propagação de uma onda eletromagnética.



Fonte: Adaptado de Stutzman (1998).

Definido um sentido de propagação para a onda, os campos elétricos e magnéticos podem ser descritos da seguinte forma:

$$\vec{E} = E_m e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \phi) \hat{x} \quad (2.5)$$

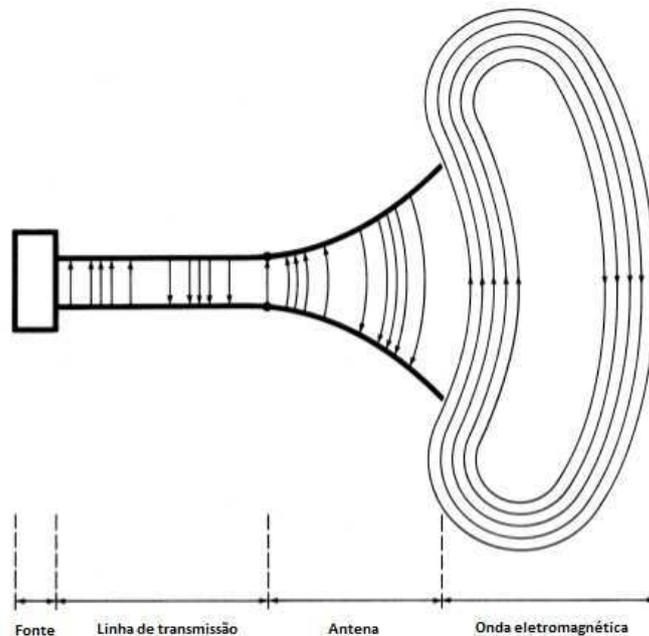
$$\vec{H} = H_m e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \phi) \hat{y} \quad (2.6)$$

Onde definimos que ϕ é o deslocamentos de fase; E_m e H_m são as amplitudes do campo elétrico e campo magnético, respectivamente; β é a constante de fase e α é fator de atenuação.

2.2 Antenas

Antena é um dispositivo primordial em qualquer sistema de comunicação via rádio. Pode ser vista como um transdutor que transforma corrente elétrica, proveniente de um condutor, em onda eletromagnética de mesma frequência para o espaço livre ou vice-versa (BALANIS, 2005). Assim, as informações podem ser transmitidas entre diferentes locais sem nenhuma estrutura intermediária (STUTZMAN, 1998).

Figura 2 – Diagrama de funcionamento de uma antena.



Fonte: Adaptado Balanis (2005).

2.2.1 Parâmetros Fundamentais

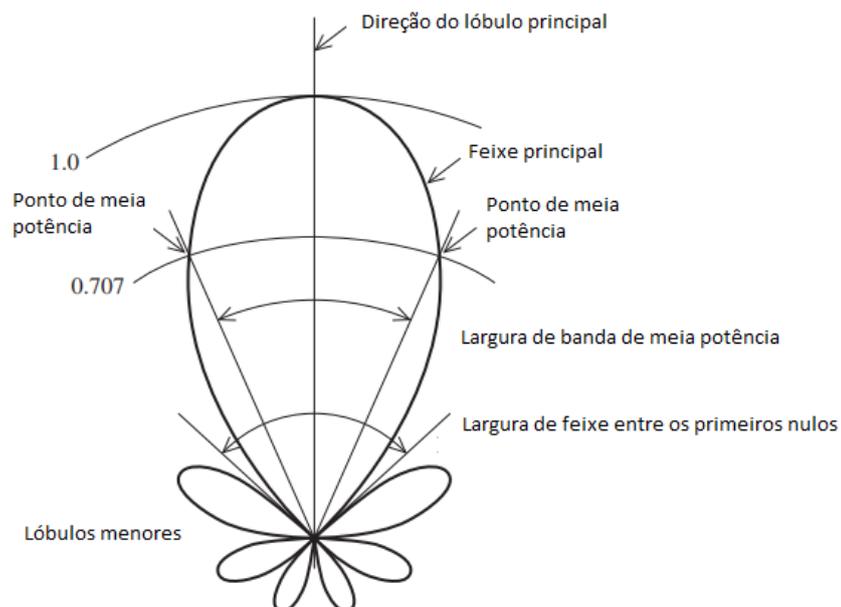
Para descrever a performance e funcionalidade de uma antena são necessários conhecimentos prévios sobre alguns parâmetros essenciais de funcionamento. Essa seção aborda tais parâmetros:

- Diagrama de irradiação;
- Polarização;
- Impedância de entrada;
- Diretividade;
- Ganho;
- Eficiência.

2.2.1.1 Diagrama de Irradiação

O diagrama de irradiação de uma antena é definido como uma função matemática ou uma representação gráfica das propriedades de irradiação da antena em função de coordenadas espaciais (BALANIS, 2005). É de extrema importância na determinação de características, tais como: formato do feixe, tamanho do feixe, ganho e diretividade.

Figura 3 – Diagrama de irradiação.



Fonte: Adaptado de Stutzman (1998).

Na figura 3 são apresentadas algumas características:

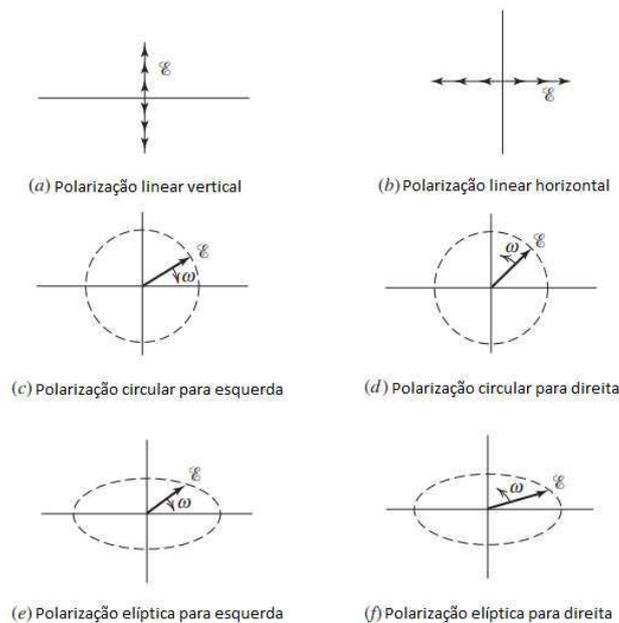
- Direção do lóbulo principal - direção na qual a maior parte da potência é irradiada;
- Lóbulos secundários - conjunto de lóbulos não contendo o lóbulo principal;
- Largura de banda de meia potência - largura de banda na qual a potência irradiada atinge metade do seu valor máximo;
- Largura de feixe entre nulos - largura de feixe na qual a potência irradiada atinge seu valor mínimo;

2.2.1.2 Polarização

A polarização de uma antena é a polarização da onda irradiada em uma determinada direção (STUTZMAN, 1998). Essa polarização é definida como a propriedade da onda eletromagnética que descreve a direção e amplitude, variantes no tempo, do vetor campo elétrico, ou seja, é a curva traçada em função do tempo, pela extremidade do vetor em um ponto fixo no espaço, sendo observado ao longo da direção de propagação (LUCENA, 2018).

A polarização de uma onda pode ser classificada em três tipos: linear, circular e elíptica.

Figura 4 – Estados de polarização de uma onda.



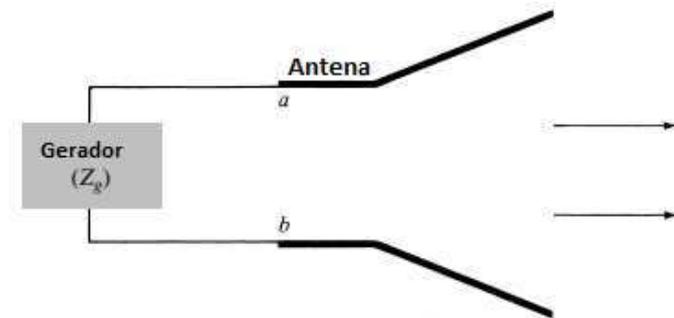
Fonte: Adaptado de Stutzman (1998).

2.2.1.3 Impedância de Entrada

A principal função de uma antena é transformar uma onda guiada em uma onda não guiada. Nesse processo, passamos por estruturas intermediárias, como as linhas de

transmissão, que tem como objetivo promover uma ligação entre a antena e o transmissor ou receptor.

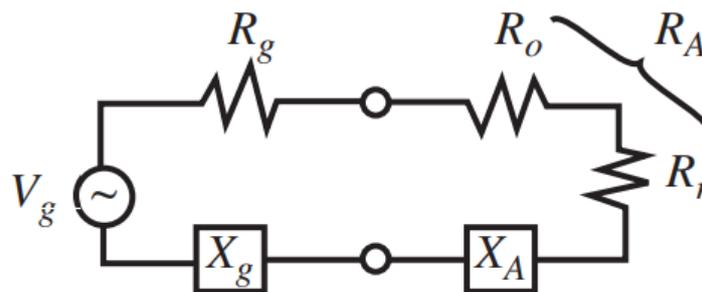
Figura 5 – Terminais de entrada de uma antena.



Fonte: Adaptado de Balanis (2005).

A impedância vista nos terminais de entrada da antena promove o casamento de impedância com a linha de transmissão. Esse parâmetro tem o objetivo de promover a máxima transferência de potência entre a fonte e a antena. O circuito equivalente do sistema é apresentado a seguir:

Figura 6 – Circuito equivalente de uma antena transmissora.



Fonte: Adaptado de Stutzman (1998).

A impedância de entrada é definida como:

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (2.7)$$

Em que Z_a é a impedância da antena vista dos terminais de entrada, R_a é a resistência da antena vista dos terminais de entrada e X_a é a reatância da antena vista dos terminais de entrada.

2.2.1.4 Diretividade

Uma propriedade importante das antenas é a capacidade de concentrar energia em determinada direção em preferência à outras.

Quantitativamente, a diretividade de uma antena é a razão entre a intensidade de irradiação, em determinada direção, e a intensidade de irradiação média em todas as direções. Determinada pela equação:

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} \quad (2.8)$$

$$D_{max} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.9)$$

Em que D_{max} é a diretividade máxima da antena, U_{max} intensidade de irradiação máxima e P_{rad} potência total irradiada.

2.2.1.5 Ganho

Outra medida que descreve o desempenho da antena é o ganho. O ganho pode ser definido como: a relação da intensidade de irradiação, em uma dada direção, a intensidade de irradiação que seria obtida se a potência da antena fosse irradiada isotropicamente (BALANIS, 2005).

Esse parâmetro pode ser expresso pela equação:

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{ent}} \quad (2.10)$$

Em que $U(\theta, \phi)$ seria a intensidade de irradiação variando em função do espaço, P_{ent} seria a potência de entrada nos terminais da antena e G o ganho da antena.

2.2.1.6 Eficiência

A eficiência (η_{rad}) é a relação entre a potência irradiada (P_{rad}) e a potência de entrada (P_{ent}), ou seja, indica quanto de potência é transmitida, dada pela potência recebida.

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{ent}} \quad (2.11)$$

2.2.2 Tipos de Antenas

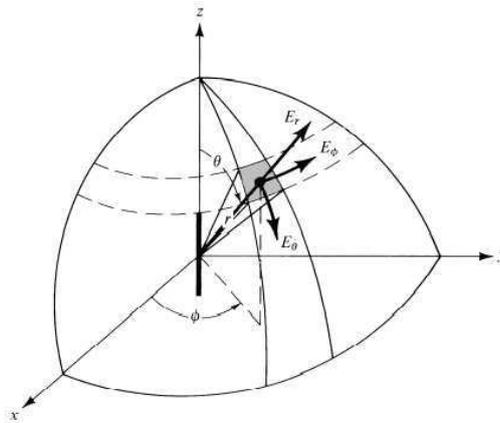
Nessa seção abordaremos os tipos de antena utilizado ao longo do trabalho, bem como algumas características.

2.2.2.1 Antenas Dipolo

A antena dipolo é a base para a compreensão de qualquer outra antena. Muitas delas são modeladas tendo-se por referência a antena dipolo. A primeira transmissão de ondas eletromagnéticas na história, realizada por Hertz em 1887, empregou um dipolo como antena transmissor (KRAUS, 1988).

Antenas de diversos formatos podem ser analisadas como sendo uma distribuição contínua de pequenos dipolos infinitesimais, e desta forma seu campo elétrico total é obtido por integração. Conjuntos de antenas são projetados tendo-se como referência a adição vetorial de grandezas como campo elétrico ou potencial elétrico.

Figura 7 – Antena dipolo.



Fonte: Balanis (2005).

Para analisar alguns dos principais parâmetros dos dipolos faz-se necessário determinar primeiramente o vetor potencial magnético e, a partir deste, deduzir os parâmetros de interesse.

$$\vec{A} = \frac{\mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \hat{z} \quad (2.12)$$

Em que μ é a permeabilidade magnética; l é o comprimento do dipolo, k número de onda, r é a distância de um ponto até o dipolo e I_0 a corrente no dipolo.

Tendo definido o vetor potencial magnético, aplicamos o operador rotacional, obtêm-se o seguinte campo magnético:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (2.13)$$

$$H_r = H_\theta = 0 \quad (2.14)$$

$$H_\phi = j \frac{kI_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (2.15)$$

Utilizando a lei de Ampère no campo magnético obtido, definido pelas coordenadas em (2.14) e (2.15). Temos o seguinte campo elétrico:

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos \theta}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (2.16)$$

$$E_\theta = j\eta \frac{kI_0 l \cos \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (2.17)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.18)$$

Em que o η será a impedância intrínseca do meio. Dado pela equação:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.19)$$

Definido os campos elétricos e magnéticos do dipolo, calcularemos os seus respectivos parâmetros.

A potência do dipolo pode ser calculada pela equação:

$$P = \frac{1}{2} \int \int_S \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot d\mathbf{S} \quad (2.20)$$

Em que substituindo as equações (2.15) (2.16) e (2.17) em (2.20) obtemos o seguinte resultado para a potência total do dipolo:

$$P = \eta \left(\frac{\pi}{3} \right) \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \left[1 - j \frac{1}{(kr)^3} \right] \quad (2.21)$$

Percebemos na equação que a potência total apresenta uma parte real e outra imaginária. Onde denotamos como potência irradiada a parte real da equação (2.21). Dada por:

$$P = \eta \left(\frac{\pi}{3} \right) \left| \frac{I_0 l}{\lambda} \right|^2 \quad (2.22)$$

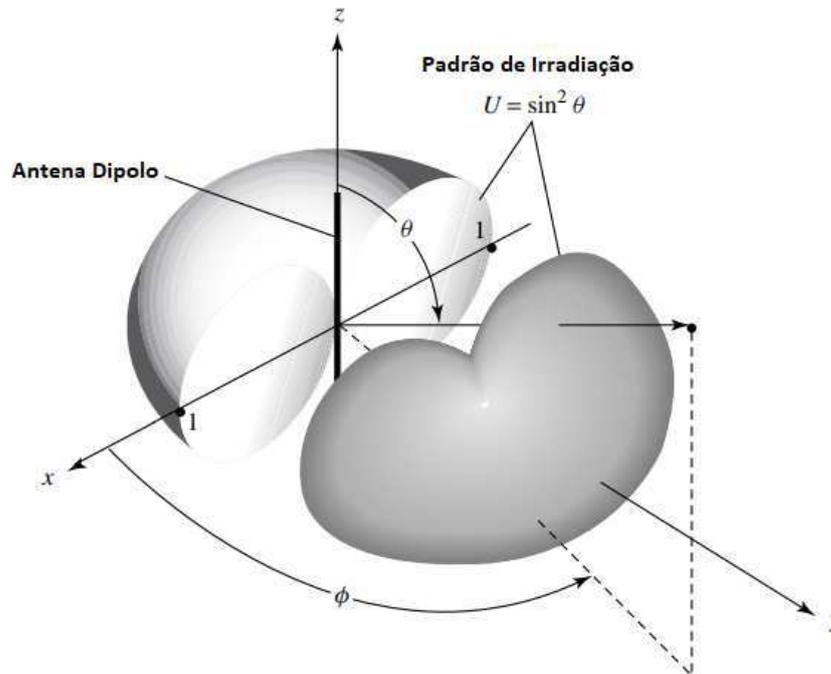
A intensidade de irradiação do dipolo. Definida pela equação:

$$U = \frac{\eta}{2} \left(\frac{kI_0 l}{4\pi} \right)^2 \sin^2 \theta \quad (2.23)$$

Cujo o máximo ocorre em $\theta = 90^\circ$. Pode ser representada, como:

$$U_{max} = \frac{\eta}{2} \left(\frac{k I_0 l}{4\pi} \right)^2 \quad (2.24)$$

Figura 8 – Diagrama de irradiação de um dipolo.



Fonte: adaptado de Balanis (2005).

Definido a potência irradiada e a intensidade de irradiação do dipolo, faz-se uso das equações (2.9), (2.10) e (2.11), definidas anteriormente, para o cálculo dos parâmetros como diretividade, ganho e eficiência.

2.2.2.2 Antenas Monopolo

As antenas monopolo apresentam características semelhantes as antenas dipolo. Diferenciam-se apenas em alguns aspectos, devido ao comprimento elétrico da antena, visto que apresentam metade do comprimento elétrico do dipolo, conseqüentemente possuem um maior comprimento de onda. Podemos citar como as principais características:

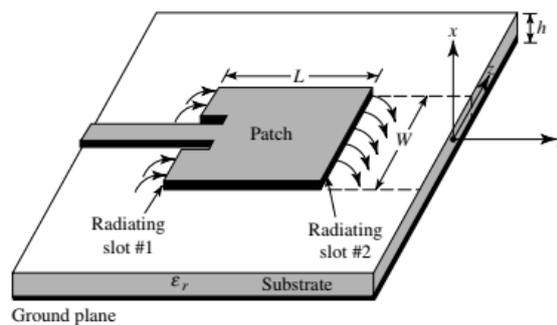
- Apresentam a mesma intensidade de irradiação;
- O monopolo apresenta metade do valor de potência irradiada e impedância de entrada;
- A diretividade do monopolo é o dobro do dipolo;
- Ganho do monopolo é duas vezes maior em comparação ao dipolo.

2.2.2.3 Antenas de Microfita

Os primeiros estudos sobre as antenas de microfita foram escritos pela primeira vez por Deschamps em 1953, mas se tornaram populares a partir de 1970 quando foram utilizadas nas mais diversas aplicações e demonstraram possuir características interessantes para as comunicações sem fio (BALANIS, 2005).

Fundamentalmente as antenas de microfita constituem em duas placas metálicas, paralelas, unidas por um substrato dielétrico isolador, onde uma das placas é o elemento irradiador e o outro é um plano terra.

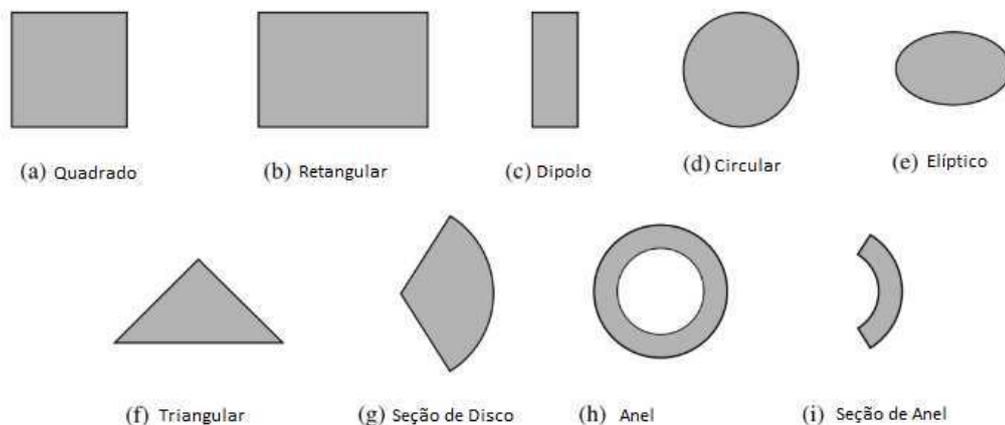
Figura 9 – Antena de microfita.



Fonte: adaptado de Stutzman (1998).

O *patch* irradiante de uma antena de microfita é representado por uma placa metálica de espessura muito fina, menor que o comprimento de onda guiado pela estrutura de microfita (BALANIS, 2005).

Figura 10 – Diversos formatos de *patches*



Fonte: adaptado de Stutzman (1998).

O elemento *patch*, teoricamente, pode assumir qualquer forma geométrica. Entretanto, para simplificação da análise e previsão do desempenho normalmente são utilizadas as formas geométricas tradicionais, como as retangulares ou circulares. O material condutor

normalmente é o cobre e em algumas aplicações específicas usa-se o ouro (CAPOVILLA, 2004).

As principais vantagens das antenas de microfita frente as outras são:

- Baixo custo de fabricação;
- Facilidade de construção;
- Facilidade em relação aos formatos;
- Fácil adaptação a qualquer superfície.

Entretanto, as antenas de microfita apresentam algumas desvantagens frente as outras antenas:

- Pequena largura de banda;
- Baixo ganho;
- Perdas devido a capacitância parasita;

2.2.2.4 Antenas Reconfiguráveis

Diferentes tipos de antenas foram desenvolvidos nos últimos anos. Essas variedades incluem dipolos, os monopolos, microfita entre outras. Cada uma possui benefícios e limitações que as tornam mais ou menos apropriadas para determinadas aplicações.

Uma antena reconfigurável, significa que ela é capaz de modificar parâmetros fundamentais de funcionamento. A ideia de reconfigurar algum parâmetro surge devido a limitação que antenas com características fixas impõe aos novos sistemas de comunicação (ANTONIO, 2018). Tornar as antenas reconfiguráveis possibilita sistemas mais dinâmicos, de forma que seu comportamento se adapta as particularidades de cada sistema podendo reduzir ou eliminar restrições e adicionando funcionalidades.

Idealmente, uma antena reconfigurável deve ser capaz de modificar independentemente um ou mais dentre os seguintes parâmetros: frequência de operação, largura de banda, polarização e diagrama de irradiação. O principal desafio encontrado quando se deseja desenvolver este tipo de antena é obter soluções eficientes e de custo efetivo.

Antenas com diagramas de irradiação reconfiguráveis, tema principal deste trabalho, tem recebido maior atenção nos últimos anos. Visto que permitem uma série de benefícios e aplicações como:

- Melhoria na capacidade de direcionamento de feixe;

- Melhorar o desempenho do sistema;
- Diminuir a interferência de sinais.

Há vários métodos de se obter a reconfigurabilidade de uma antena, embora alguns sejam mais efetivos que outros em performance e aplicação:

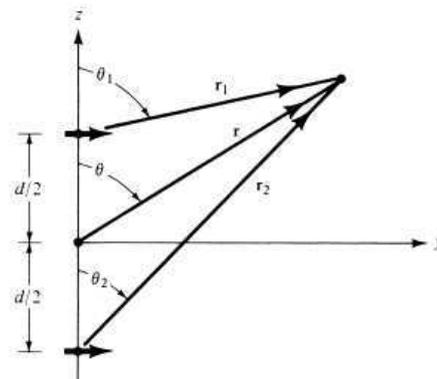
- Meios mecânicos;
- Chaveamento eletrônico;
- Chaveamento óptico;
- Metamateriais.

2.3 Arranjos de Antenas

Em diversas aplicações nas comunicações sem fio, para atender um determinado link de comunicação, são propostas mudanças na estrutura da antena. Geralmente, essas mudanças são de duas formas: aumentar as dimensões dos elementos irradiantes ou formar um agrupamento de elementos irradiantes.

Os arranjos são populares pela capacidade de moldar os padrões de irradiação através do espaçamento e excitação entre eles. O padrão gerado desse arranjo será uma soma vetorial dos campos de cada elemento individual. Na maioria dos casos os elementos de um conjunto são idênticos. Isso não é necessário, porém é conveniente, mais simples e prático. Os elementos individuais de um conjunto podem ter diferentes formas (BALANIS, 2005).

Figura 11 – Arranjo de dois dipolos infinitesimal.



Fonte: adaptado de Stutzman (1998).

Assumindo que o arranjo é percorrido por uma corrente de excitação I_{e1} e I_{e2} da forma:

$$I_{e1} = I_{01} e^{j\beta} \quad (2.25)$$

$$I_{e2} = I_{02}e^{j\beta} \quad (2.26)$$

Os campos elétricos, em campos distantes, são fornecidos pela expressão:

$$\vec{E}_1 = j\eta \frac{kI_{01}le^{-j(kr_1-\beta)}}{4\pi r_1} \sin \theta_1 \hat{a}_\theta \quad (2.27)$$

$$\vec{E}_2 = j\eta \frac{kI_{02}le^{-j(kr_2-\beta)}}{4\pi r_2} \sin \theta_2 \hat{a}_\theta \quad (2.28)$$

Podemos considerar para regiões de campos distantes, $r \gg d$, de modo a obter as seguintes simplificações:

$$\theta \cong \theta_1 \cong \theta_2 \quad (2.29)$$

$$r \cong r_1 \cong r_2 \quad (2.30)$$

$$kr_1 \cong k \left(r - \frac{d}{2} \cos \theta \right) \quad (2.31)$$

$$kr_2 \cong k \left(r + \frac{d}{2} \cos \theta \right) \quad (2.32)$$

Como o campo produzido pelo arranjo é igual à superposição dos campos individuais. Temos o seguinte campo total:

$$\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2.33)$$

$$\vec{E}_T = j\eta \frac{kI_0le^{-j(kr)}}{4\pi r} \cos \theta \left[e^{j(kd \cos \theta + \beta)/2} + e^{-j(kd \cos \theta + \beta)/2} \right] \hat{a}_\theta \quad (2.34)$$

$$\vec{E}_T = j\eta \frac{kI_0le^{-j(kr)}}{4\pi r} \cos \theta \left[2 \cos \left[\frac{1}{2}(kd \cos \theta) + \beta \right] \right] \hat{a}_\theta \quad (2.35)$$

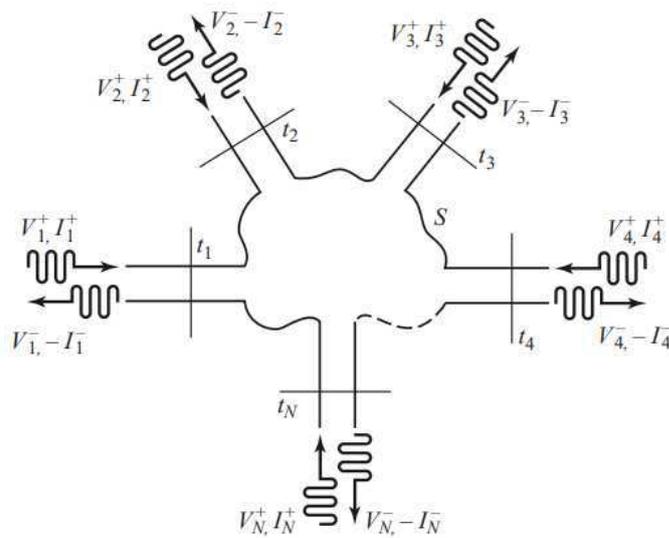
$$\vec{E}_T = \vec{E}_0 \cdot FA \quad (2.36)$$

Verifica-se que o campo total, \vec{E}_T , é igual ao campo de um único elemento, multiplicado por um fator, conhecido como fator de arranjo, FA . Esse processo pode ser estendido para arranjos com inúmeros elementos.

2.4 Parâmetros S

Os parâmetros S (espalhamento) relacionam as ondas de tensão refletidas com aquelas incidentes na(s) portas(s) da rede analisadas. Por exemplo, o parâmetro S_{ij} é calculado pela razão entre a onda transmitida na porta i devido a onda incidente na porta j .

Figura 12 – Parâmetros S



Fonte: Pozar (2009).

A existência de uma onda refletida se origina da necessidade de satisfazer todas as condições de fronteira para tensão e corrente nas extremidades das linhas de transmissão e nos pontos onde duas linhas diferentes estão conectadas uma à outra (HAYT, 2008)

Podemos representar o coeficiente de reflexão (Γ) e o coeficiente de transmissão (T) pelas equações:

$$\Gamma = \frac{Z_l - Z_c}{Z_l + Z_c} \quad (2.37)$$

$$T = \frac{2Z_l}{Z_l + Z_c} \quad (2.38)$$

Em que Z_l representa a impedância característica da linha e Z_c representa a impedância da carga. O coeficiente de reflexão varia entre $0 < \Gamma < 1$, apresentando casamento total de impedância e máxima transferência de potência para ($\Gamma = 1$).

Matematicamente a matriz de espalhamento pode ser representada da forma:

$$[V^-] = [S] \cdot [V^+] \quad (2.39)$$

Em que, temos os seguintes parâmetros:

- $[V^-]$ é a matriz das tensões refletidas em cada porta;
- $[V^+]$ é a matriz das tensões incidentes em cada porta;
- $[S]$ é a matriz de espalhamento.

Cada elemento da matriz pode ser encontrada pela relação:

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \quad (2.40)$$

Como os parâmetros S são geralmente complexos, é mais conveniente a sua representação em termos de amplitude e fase:

$$S_{ij} = |S_{ij}|e^{j\phi_{ij}} \quad (2.41)$$

Em dB, pode ser calculada da forma:

$$|S_{ij}|(dB) = 20\log|S_{ij}| \quad (2.42)$$

Para caracterização da matriz de espalhamento é necessário mais dois parâmetros que são perda por inserção (*Insertion Loss*) entre as portas i e j, isto é, medida sempre de uma porta para outra, e a perda de retorno (*Return Loss*) na porta j, ou seja, sempre medida em relação à mesma porta.

2.5 Componentes Eletrônicos

Essa seção visa apresentar conceitos sobre os principais componentes eletrônicos utilizados ao longo do trabalho. Como também apresentar o mecanismo de chaveamento do diodo, responsável pela reconfigurabilidade da antena.

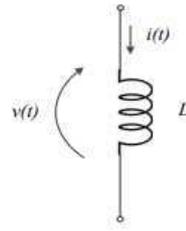
2.5.1 Indutor

Trata-se de um componente reativo, capaz de acumular energia em forma de campo magnético. É capaz de afetar o comportamento de um circuito sem dissipar energia (idealmente), sendo muito utilizado em projetos de circuitos eletrônicos para uma ampla gama de aplicações.

Um indutor consiste basicamente de um fio de condutor enrolado, em geral o cobre. O comportamento de um indutor pode ser descrito pela equação:

$$v_{(t)} = L \frac{di_{(t)}}{dt} \quad (2.43)$$

Figura 13 – Indutor



Fonte: o autor.

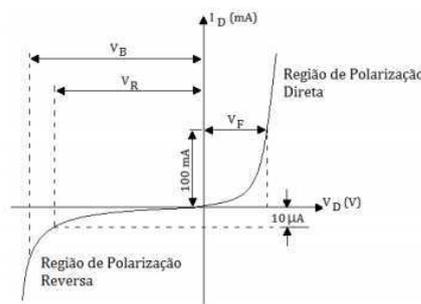
Verifica-se que a tensão sobre o elemento corresponde à derivada da corrente multiplicada por uma constante, L , denominada indutância. Percebemos que quanto maior for a indutância maior será a capacidade do indutor de armazenar energia magnética.

2.5.2 Diodo PIN

Em trabalhos recentes, o dispositivo de chaveamento RF mais utilizado em reconfigurabilidade de antenas é o diodo PIN. Ele possui algumas características vantajosas como: tamanho pequeno, baixo consumo de potência, alta velocidade de chaveamento e baixa perda de inserção.

As junções tipos P e N do semiconductor são separadas por uma região intrínseca de alta resistividade, I, cuja largura tem um papel importante no desempenho do componente (RODRIGUES, 2016).

Figura 14 – Curva característica de um diodo PIN

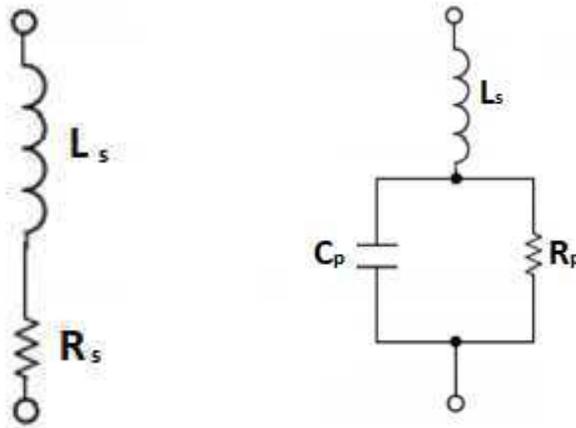


Fonte: MARANTIS *et al.* (2017).

Dentre as configurações implementadas no chaveamento destaca-se a ON/OFF. Quando o diodo está sob polarização direta, elétrons e lacunas são injetados na região I. Logo, ele assume o estado ON e pode ser representado por um circuito equivalente de uma resistência (R_s) em série com uma indutância (L_s).

Quando está polarizado de forma reversa, não existe nenhuma carga na região I. Logo, o componente assume o estado OFF e pode ser representado como uma grande resistência (R_p) em paralelo com um capacitor (C_p), estando ambos em série com a indutância (L_s).

Figura 15 – Circuito equivalente do diodo PIN.



(a) estado ON

(b) estado OFF.

Fonte: o autor.

A propriedade mais importante do diodo PIN é o fato de que, sob certas circunstâncias pode se comportar de formas diferentes nas frequências RF, por meio de um controle de uma corrente DC. Podendo atuar como:

- Chaveador;
- Atenuador;
- Defasador.

2.6 Simulação Eletromagnética

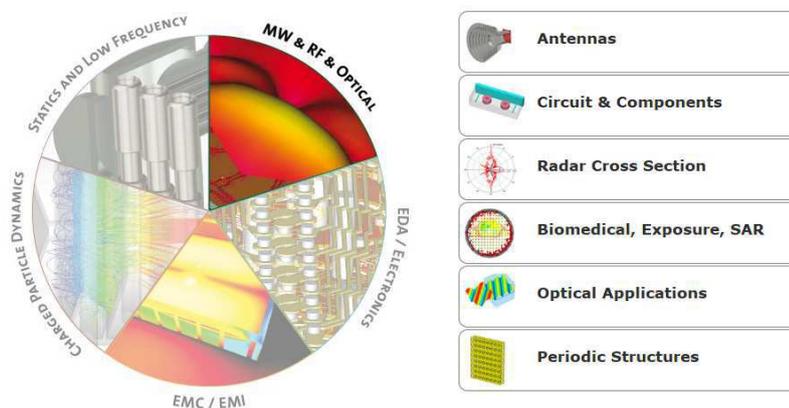
Problemas de natureza eletromagnética, são resolvidos, de uma forma geral, com aproximações que facilitem a sua resolução de forma menos complexa. Os instrumentos clássicos na abordagem de tais problemas são os métodos numéricos, que são ferramentas matemáticas desenvolvidas para a modelagem de protótipos.

Os métodos numéricos, com o advento de computadores dotados de alto índice de desempenho, têm sido adotados como uma alternativa mais poderosa na resolução de problemas complexos de natureza eletromagnética.

O *CST Studio Suite* é composto por vários módulos como exemplo o *CST Microwave Studio* e o *CST Design Suite*. O *CST Microwave Studio* é apropriado para simulação de

dispositivos de micro-ondas. O método numérico utilizado pelo *software* é a técnica da integração finita (*Finite Integration Technique*) e foi proposta, inicialmente, por Weiland em 1977.

Figura 16 – Interface gráfica do CST



Fonte: o autor.

Esse método proporciona um esquema universal de discretização espacial aplicável a vários problemas que envolvem eletromagnetismo, abrangendo desde cálculos de campo estático, a aplicações de altas frequências no domínio do tempo e da frequência, utilizando dimensões realísticas.

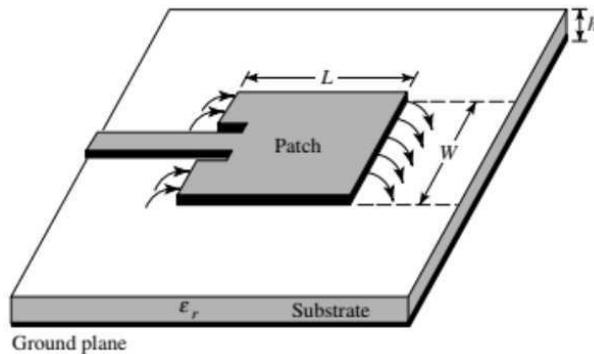
3 Antenas Reconfiguráveis

3.1 Modelagem Matemática

3.1.1 Alimentação por Linha de Microfita

Na técnica de alimentação por linha de microfita, uma fita condutora, com largura muito inferior ao do *patch*, é conectada à extremidade do elemento irradiador. Esse método foi o pioneiro em aplicações práticas e é caracterizado pela facilidade na modelagem e fabricação. Em contrapartida, o método apresenta limitações, como geração de irradiação indesejada à medida em que a espessura do substrato dielétrico aumenta, provocando, entre outros efeitos, a limitação na largura de banda (BAHL; BHARTIA, 1982).

Figura 17 – Alimentação por linha de microfita



Fonte: Balanis (2005).

Neste tipo de alimentação, obtém-se um casamento de impedância mais facilmente, uma vez que a impedância característica da linha pode ser controlada ao se ajustar a largura da fita condutora sobre o substrato dielétrico de espessura definida (LUCENA, 2018).

Para a construção da linha de microfita são utilizadas equações presentes na literatura clássica. Inicialmente é feito o cálculo da impedância característica da linha (Z_0) e da sua permissividade efetiva (ϵ_{ff}). Por meio das equações abaixo, são obtidos os resultados para a impedância característica da linha e permissividade efetiva, respectivamente.

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ff}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + 0,25 \frac{w}{h} \right) \quad (3.1)$$

Em que, ϵ_{ff} é dado pela equação:

$$\epsilon_{ff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} + 0,041 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

Em que w é a largura da linha, h é a altura do substrato. Considerando ainda que a largura da linha é menor que a altura do substrato, ou seja, $w/h < 1$. Quando a largura da linha é igual ou superior à altura do substrato, ou seja, $w/h > 1$, tem-se as seguintes equações:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{ff}}} \left(\frac{1}{w/h + 1,393 + 0,677 \ln(w/h) + 1,444} \right) \quad (3.3)$$

Em que, ε_{ff} é dado pela equação:

$$\varepsilon_{ff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \right] \quad (3.4)$$

Em acordo com as equações definidas acima, fizemos a primeira estimativa da impedância de entrada da linha. Foram utilizados os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros fundamentais da antena.

Parâmetros fundamentais da antena	
Parâmetro	Valor
Permissividade relativa do substrato (ε_r)	2,64
Altura do substrato (h)	0,78mm
Largura da linha (W)	5mm

Fonte: o autor

Obtendo-se uma relação de $w/h > 1$. Fizemos a substituição dos valores nas equações (3.1) e (3.2), encontrando os seguintes valores, para a impedância de entrada da antena (Z_0) e sua permissividade efetiva (ε_{ff}) apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Impedância de entrada da linha e permissividade efetiva

Impedância de entrada da linha e permissividade efetiva	
Parâmetro	Valor
Impedância de entrada (Z_0)	20,23Ω
Permissividade efetiva (ε_{ff})	3,21

Fonte: o autor

A faixa de valores para a impedância característica da linha de microfita, geralmente, situa-se entre 20Ω e 120Ω; as faixas de valores das constantes dielétricas utilizados, em

geral, está entre 2 e 10; e as espessuras típicas para o substrato dielétrico são 0,6325mm e 1,587mm.

3.1.2 Patch

O *patch* retangular é a configuração mais popular em antenas de microfita. Uma antena de microfita retangular pode ser representada por uma matriz de dois *slots* cada um possuindo uma largura W , altura h e separados por uma distância L (BALANIS, 2005).

Para o design dos *patches* irradiadores da antena, foram considerados parâmetros específicos da antena como: frequência de ressonância (f_r), altura do substrato (h), constante dielétrica do substrato (ϵ_r) e velocidade da luz no espaço livre (v_0). Para o cálculo dos irradiadores foi usada a fórmula dada por:

$$W = \frac{v_0}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.5)$$

$$L = \frac{1}{2f \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (3.6)$$

Em acordo com as equações definidas acima, fizemos a primeira estimativa para as dimensões do *patch* modelado. Em que foram utilizados os valores dos parâmetros apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Constantes para estimativa das dimensões do *patch*.

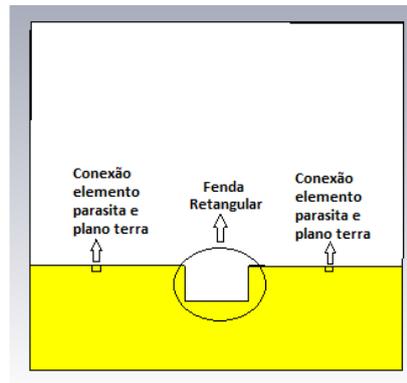
Dimensões da Antena Simulada	
Parâmetro	Valor
Permissividade relativa do substrato (ϵ_r)	2,64
Frequência de ressonância (f_r)	5,90GHz
Velocidade da luz no vácuo (c_0)	$3.10^8 m/s$
Permeabilidade magnética no vácuo (μ_0)	$4\pi.10^{-7}$
Permissividade elétrica no vácuo (ϵ_0)	$8,85.10^{-12} mm$

Fonte: o autor

3.1.3 Plano terra truncado

As dimensões do plano terra são parâmetros fundamentais no projeto da antena, devido a dependência direta com a largura de banda. Um plano terra truncado nada mais é do que um plano parcial, que cobre metade ou menos da metade da estrutura inferior de uma antena (RODRIGUES, 2016).

Figura 18 – Plano terra truncado utilizado na antena.



Fonte: o autor.

O formato do plano terra tem importantes efeitos no desempenho da antena, pois podem afetar diretamente o casamento de impedância, como também influenciar o diagrama de irradiação. Técnicas para melhorar esse parâmetro tem sido propostas tais como: melhorias na distância entre o começo do *patch* e o fim do plano terra, realização de chanfros nas bordas do plano terra, uso de múltiplas alimentações e emprego de uma fenda retangular no plano de terra proposto (Bao *et al.*, 2007).

As dimensões da fenda retangular no plano de terra consistem em melhorar o casamento de impedância da antena, permitindo melhores resultados na largura de banda e diagrama de irradiação. Essas dimensões foram obtidas através de processos de otimização computacional de modo a obter os melhores resultados para o desempenho da antena.

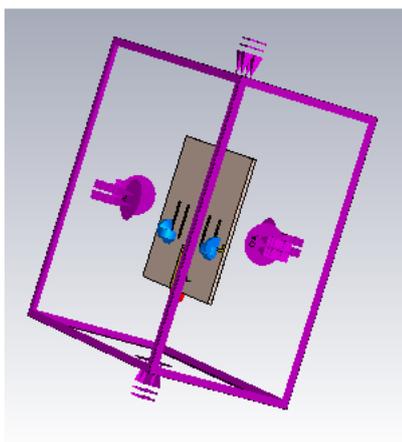
3.2 Simulação Computacional

Nesta seção abordaremos os principais tópicos para a modelagem da antena proposta no ambiente do software. Como também a caracterização dos principais elementos que compõe a antena projetada.

3.2.1 CST

O CST Microwave Studio é uma ferramenta de simulação eletromagnética em 3D. Ele permite a análise rápida e precisa de componentes de alta frequência tais como antenas, filtro, acopladores e estruturas multicamadas. Neste projeto foi utilizado o solucionador no domínio do tempo para representação dos sinais que é notavelmente eficiente para aplicações em alta frequência.

Figura 19 – Estrutura da antena e condições de contorno no CST.



Fonte: o autor.

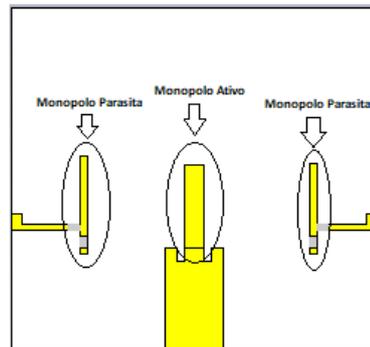
A primeira etapa consiste em definir um design apropriado para a construção da antena. O próximo passo foi criar um layout da antena com o substrato, patch, plano terra e tipo de excitação. Definido os principais parâmetros da antena e com base nos resultados obtidos na seção anterior, vimos que a excitação da antena será realizada por uma porta discreta de 50 Ohms e sua condição de contorno será a de espaço livre para toda a estrutura. Logo, encontramos os primeiros resultados para o desenvolvimento no ambiente de simulação.

3.2.2 Antena Planar

A antena desenvolvida nesse trabalho é constituída de um conjunto de monopolos sendo um ativo e dois monopolos parasitas. Foi escolhida essa configuração por apresentar características como baixo custo de fabricação, baixa complexidade e tamanho reduzido (Marantis *et al.*, 2017).

O substrato utilizado foi o Rogers (RO4725-JXR) com constante dielétrica de $\epsilon_r = 2,64$ e com espessura de 0,78 mm. A antena possui dimensões de $W = 32$ mm de largura e $L = 30$ mm de comprimento. O monopolo ativo tem dimensões de $W_p = 1,65$ mm de largura e $L_p = 7,25$ mm de comprimento, e o plano terra possui $W_s = 32$ mm de largura e $L_s = 9$ mm de comprimento.

Figura 20 – Antena desenvolvida



Fonte: o autor.

A antena é constituída ainda por um plano de terra truncado com a introdução de uma fenda o que possibilita uma melhoria nas características da antena como ganho, diretividade e casamento de impedância (Bao *et al.*, 2007). O projeto da antena consiste em operar na faixa de frequência entre 5,87 e 5,93 GHz, como também ter seu diagrama de irradiação em diferentes formas.

3.2.3 Chaveamento

O elemento escolhido para a operação de chaveamento da antena foi o diodo PIN, devido as suas características de baixa perda de inserção e alta velocidade de chaveamento. O modelo do diodo utilizado foi o Skyworks SMP-1320/040LF.

Figura 21 – Diodo SMD.



Fonte: o autor.

O circuito equivalente pode ser representado por uma indutância de L_{on} em série com uma resistência de R_{on} para o diodo em estado ON. Para representar o estado OFF, utilizamos uma indutância de L_{off} em série com um circuito RC em paralelo, onde temos

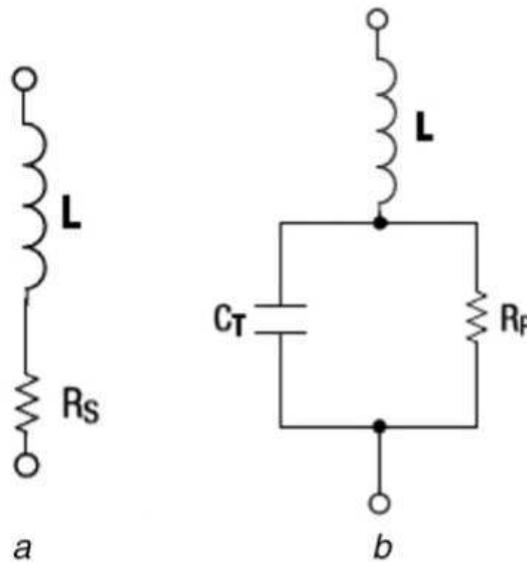
Tabela 4 – Circuito equivalente do diodo

Circuito equivalente do diodo	
Parâmetro	Valor
L_{on}	$0,45nH$
L_{off}	$0,45nH$
R_{on}	$0,9\Omega$
R_{off}	$1k\Omega$
L_{off}	$0,30pF$

uma resistência de R_{off} e uma capacitância de C_{off} .

Fonte: o autor

Figura 22 – Circuito equivalente do diodo (a) estado On (b) estado Off.



Fonte: o autor.

3.2.4 Antena Reconfigurável

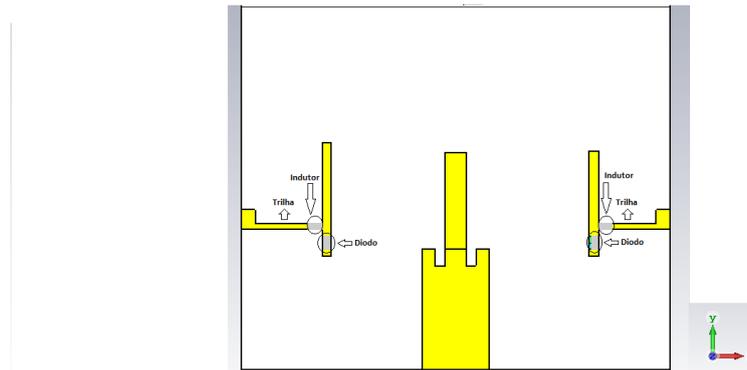
Os dois itens comentados acima serviram como base para o projeto de uma antena com padrão de irradiação reconfigurável. Ou seja, com um mesmo protótipo conseguimos três padrões diferentes de irradiação.

No ambiente de simulação foi criada a mesma estrutura da antena planar com os mesmos materiais e dimensões. A alimentação da antena foi feita através de uma porta

discreta de impedância de 50Ω . Como mencionado anteriormente, também foi inserido o circuito equivalente do diodo, mecanismo do qual a reconfigurabilidade é alcançada.

Duas trilhas metálicas foram inseridas na estrutura, essas trilhas são responsáveis por promover a alimentação do diodo. Para evitar que as trilhas influenciem na resposta RF da antenna foram adicionados indutores de $L = 18 \text{ nH}$ (Coilcraft 0302CS-18NXJLU).

Figura 23 – Antena desenvolvida



Fonte: o autor.

A reconfigurabilidade da antena é alcançada pela conexão dos monopolos parasitas ao plano terra através dos diodos. O funcionamento pode ser dado em dois principais cenários: o diodo no estado de funcionamento ON e o diodo no estado de funcionamento OFF. As simulações foram feitas considerando os principais aspectos teóricos abordados no capítulo 2, de forma a promover os resultados simulados os mais próximos possíveis do teórico.

3.3 Resultados

A resposta em frequência da antena varia em função da sua geometria, alimentação, substrato do dielétrico entre outros fatores. A geometria retangular dos monopolos e o truncamento no plano terra foi escolhido pelos ótimos resultados obtidos em simulações nas frequências desejadas.

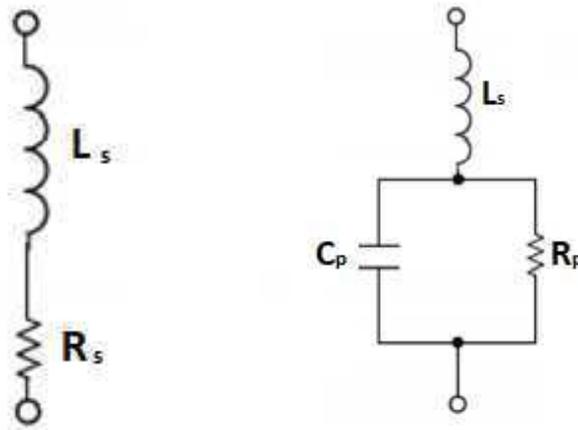
Uma antena para atuar na comunicação V2V, ela deve operar em na faixa de 5,90 GHz do espectro eletromagnético, o que significa possuir um coeficiente de reflexão abaixo de -10dB nesta faixa de frequência. Observamos nos resultados apresentados a seguir que em todas as configurações a antena atende a essas premissas, o que valida a sua aplicação em comunicações V2V.

Outro importante parâmetro analisado da antena foram os diagramas de irradiação. Podemos verificar graficamente as distribuições de campos elétricos e magnéticos no espaço em 2D para todas as configurações da antena.

3.3.1 Configuração ON/OFF

No primeiro resultado da antenna proposta, no qual ela apresenta uma configuração para os diodos no estado de ON/OFF. Ou seja, nessa configuração um monopolo parasita está conectado ao plano terra da antenna. A figura 24 mostra o circuito equivalente do diodo nessa configuração.

Figura 24 – Configuração dos diodos

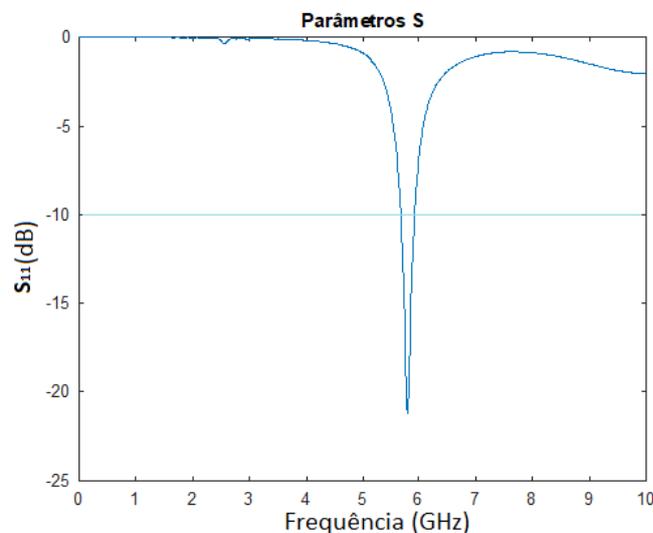


(a) diodo um estado ON. (b) diodo dois estado OFF.

Fonte: o autor.

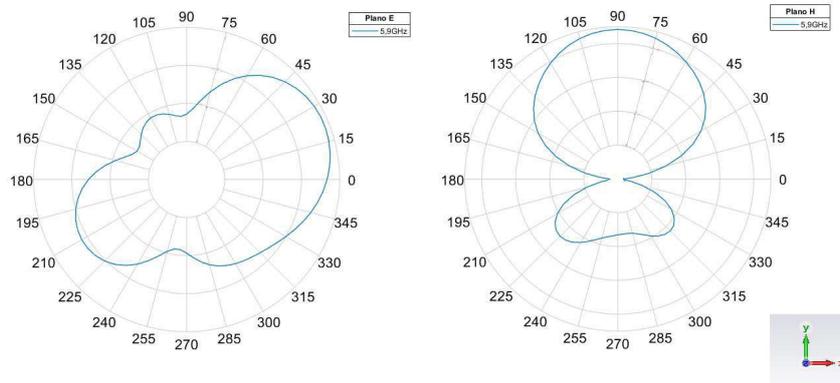
Essa antenna foi projetada para operar na frequência de 5,9 GHz que corresponde a frequência para a comunicação V2V e pode ser verificada pelo coeficiente de reflexão (S_{11}) da Figura 25.

Figura 25 – Coeficiente de reflexão para o estado ON/OFF.



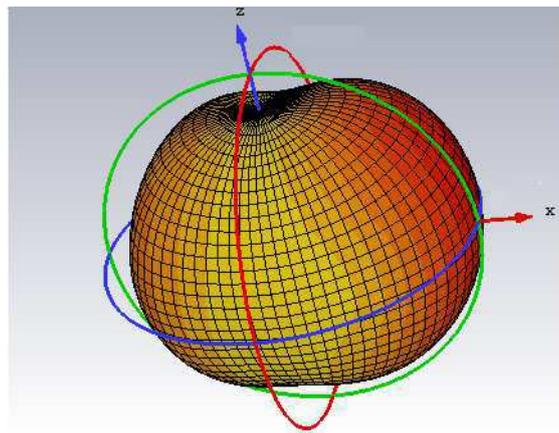
Fonte: o autor.

Figura 26 – Diagrama de irradiação para os planos E e H.



Fonte: o autor.

Figura 27 – Diagrama de irradiação 3D.



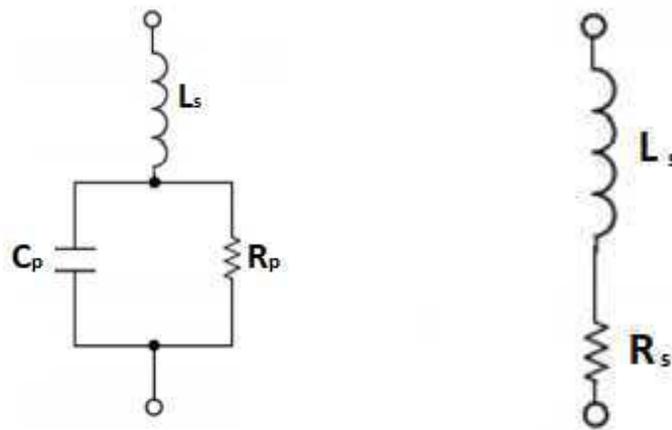
Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 25 pode-se notar uma concordância satisfatória entre o resultado proposto e o resultado simulado, considerando a faixa de frequência onde o coeficiente de reflexão é menor que -10 dB. Observamos também no diagrama de irradiação da Figura 26 um baixo nível de potência desperdiçada em direções não desejadas.

3.3.2 Configuração OFF/ON

No segundo resultado da antenna proposta, no qual ela apresenta uma configuração para os diodos no estado de OFF/ON. Como apresentado no item anterior, essa configuração também é composta de um monopolo parasita conectado ao plano terra da antenna. A Figura 28 mostra o circuito equivalente dos dois diodos utilizados na simulação.

Figura 28 – Configuração dos diodos



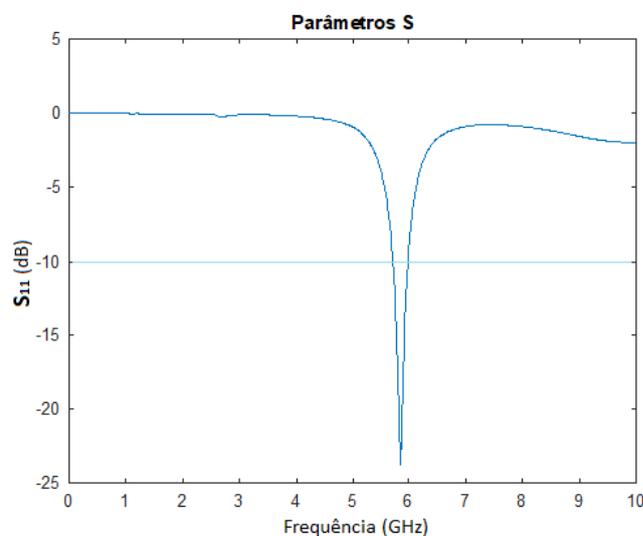
(a) diodo um estado OFF.

(b) diodo dois estado ON.

Fonte: o autor.

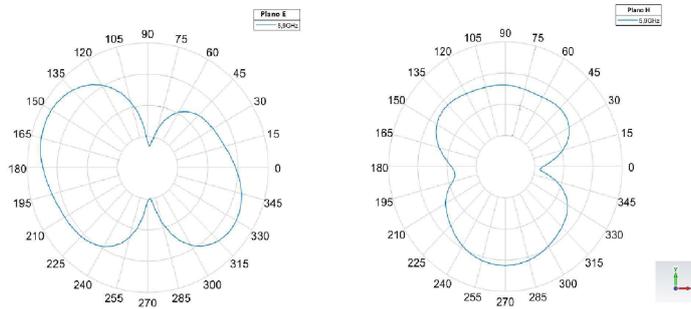
Tomando como referência a frequência para comunicação V2V essa antenna também tem a premissa de operar na frequência de 5,9 GHz e pode ser verificada pelo coeficiente de reflexão (S_{11}) da Figura 29.

Figura 29 – Coeficiente de reflexão para o estado OFF/ON.



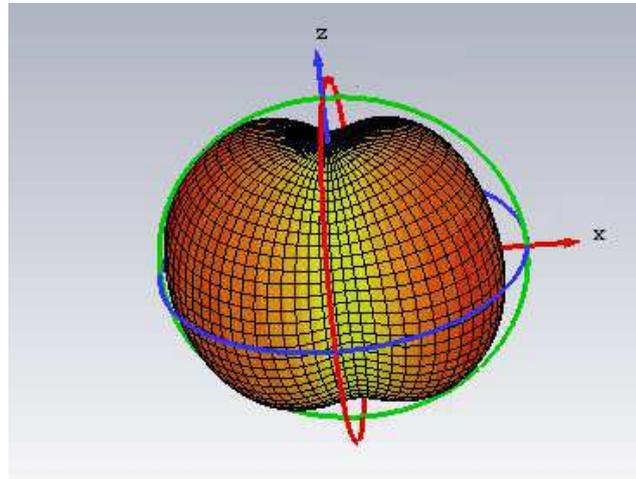
Fonte: o autor.

Figura 30 – Diagrama de irradiação para os planos E e H em 2D.



Fonte: o autor.

Figura 31 – Diagrama de irradiação em 3D.



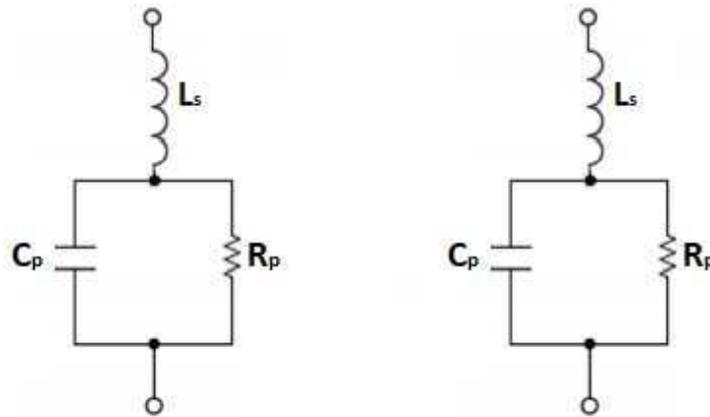
Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 29 pode-se também uma concordância entre o resultado proposto e o resultado simulado, considerando a faixa de frequência onde o coeficiente de reflexão é menor que -10 dB. Observamos também na Figura 30 o diagrama de irradiação apresenta um baixo nível de potência desperdiçada em direções não desejadas.

3.3.3 Configuração OFF/OFF

No segundo resultado da antenna proposta, no qual ela apresenta uma configuração para os diodos no estado de OFF/OFF. Diferentemente dos itens anteriores, essa configuração também não há nenhum monopolo parasita conectado ao plano terra da antenna. A Figura 32 mostra o circuito equivalente dos dois diodos utilizados na simulação.

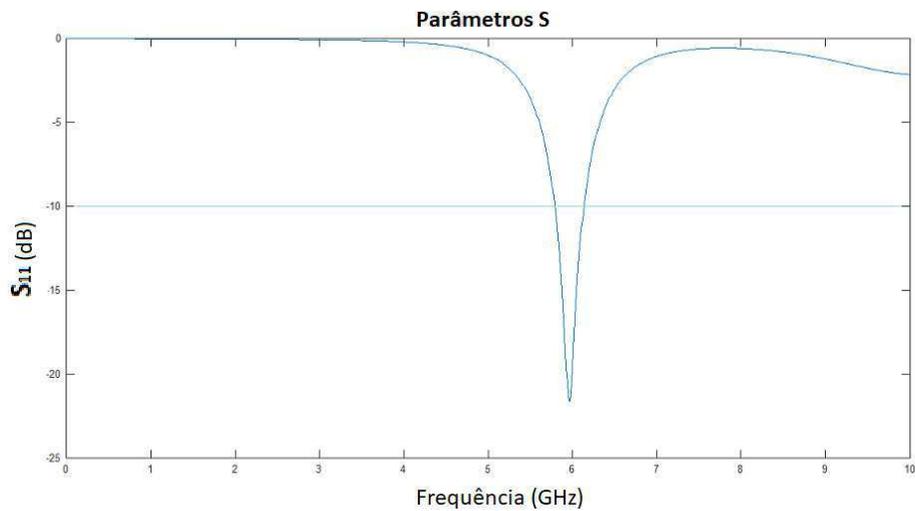
Figura 32 – Configuração dos diodos



(a) diodo um estado OFF. (b) diodo dois estado OFF.
 Fonte: o autor.

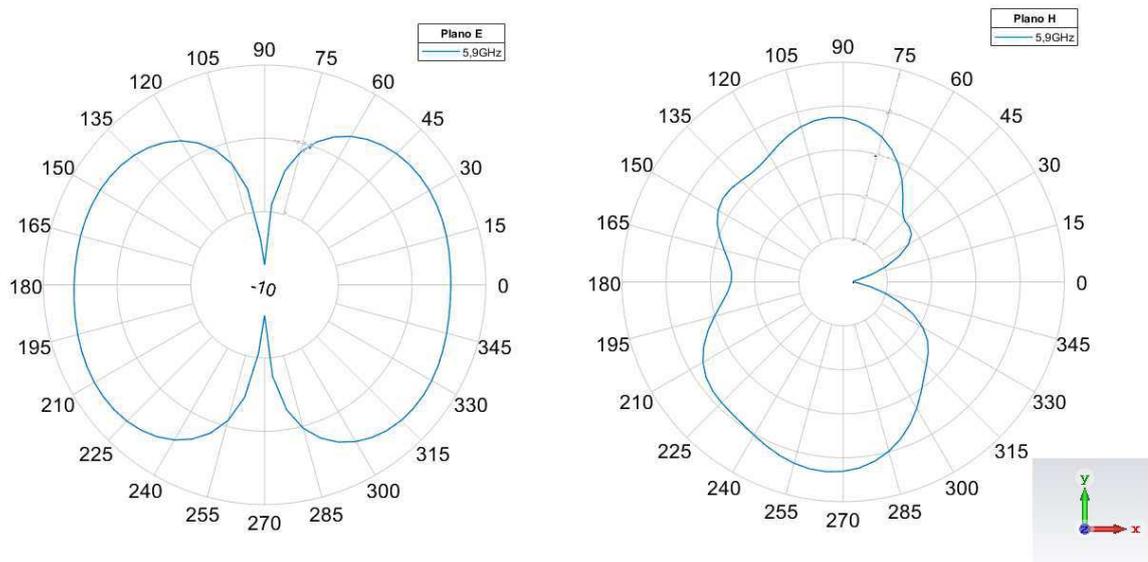
Tomando como referência a frequência para comunicação V2V essa antena também tem a premissa de operar na frequência de 5,9 GHz e pode ser verificada pelo coeficiente de reflexão (S_{11}) da Figura 33.

Figura 33 – Coeficiente de reflexão para o estado OFF/OFF.



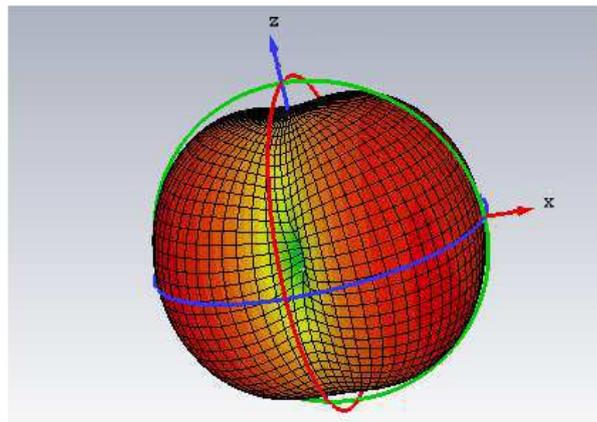
Fonte: o autor.

Figura 34 – Diagrama de irradiação para os planos E e H.



Fonte: o autor.

Figura 35 – Diagrama de irradiação em 3D.



Fonte: o autor.

Na Figura 33 pode-se observar também uma concordância entre o resultado proposto e o resultado simulado, considerando a faixa de frequência onde o coeficiente de reflexão é menor que -10 dB. Observamos também na Figura 34 no diagrama de irradiação um baixo nível de potência desperdiçada em direções não desejadas.

4 Conclusão

Nesse trabalho foi analisado a aplicação de uma antena reconfigurável para comunicações entre veículos. A incorporação dessas tecnologias de comunicações V2V tem como objetivos tornar o trânsito mais seguro e melhorar a mobilidade urbana.

A antena reconfigurável tem seu comportamento adaptado a alteração do meio ou sistema e vem de forma a substituir os tradicionais sistemas de múltiplas antenas. A antena simulada neste trabalho foi constituída de um monopolo ativo, dois monopolos parasitas, dois diodos PIN e um plano terra truncado. Vários cenários foram simulados a partir da variação dos estados dos diodos (ON e OFF), gerando assim, uma base de dados para análise do desempenho da antena.

Como parte fundamental da aplicação de antenas reconfiguráveis, a análise do desempenho da antena foi realizado a partir de dois parâmetros fundamentais, que são: o coeficiente de reflexão (S_{11}) e o diagrama de irradiação.

Dos resultados obtidos, constatou-se que o comportamento da antena é afetado pelo estado do diodo. Em cada caso onde ocorreu uma transição de estado do diodo, a antena foi capaz de produzir um padrão diferente de irradiação, como também, apresentar um valor menor que -10dB na faixa de frequência definida para as comunicações V2V.

4.1 Trabalhos futuros

Como continuação para trabalhos nessa linha de pesquisa, destaca-se os pontos:

- Investigar técnicas para miniaturização do tamanho da antena;
- Construção física da antena em ambiente laboratorial para validação de resultados simulados;
- Adição de *stubs* para a diminuição do deslocamento (*shift*) da frequência de ressonância da antena nas mudanças de estado do diodo.

5 Referências

MARANTIS, L. *et al.* Pattern reconfigurable ESPAR antenna for vehicle-to-vehicle communications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, v. 12, n. 3, p. 280-286, 2017.

COSTA, I. F. da. Antenas e superfícies seletivas de frequência reconfiguráveis para sistemas de comunicação sem fio. 2009. 104 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SADIKU, M. *Elements of electromagnetics*. 3^a. ed. Nova Iorque, EUA: Oxford University Press, 2000.

STUTZMAN, Warren L. *Antenna theory and design*. 2^a. ed. Nova Iorque, EUA, 1981.

BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3^a. ed. Hoboken, Estados Unidos: Wiley, 2005.

LUCENA, F. A. da. C. Superfícies seletivas em frequência como superstrato para aumento de ganhos em antenas. 120 f. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

KRAUS, John D. *Antennas for All Applications*. 3^a. ed. McGraw-Hill, 2002.

CAPOVILLA, C. E. Antenas planares aplicadas às comunicações móveis de últimas gerações utilizando elementos quasi-Yagi. [s.n.]. Dissertação - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2004.

ARAÚJO, J. A. de I. Filtena reconfigurável usando diodo varactor para aplicações em sistemas sem fio. 75 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4^a. ed. Hoboken, Estados Unidos: Wiley, 2012.

HAYT, William H. *Eletromagnetismo*. 8^a. ed. AMGH, 2008.

RODRIGUES, E. J. B. Antenas planares eletronicamente reconfiguráveis em frequências para sistemas de rádios cognitivos. 140 f. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

BAHL, I. J. *Microstrip Antennas*. 2^a. ed. Artech House Publishers, 1982.

L. X. Bao, M. J. "Ammana, Investigation on UWB printed monopole antenna with

rectangular slitted ground plane,” *Microwave Opt. Technol. Lett.*, v.49, p.1578-1585, Jul. 2007.

FILGUEIRAS, H. R. D. Arranjos de antenas reconfiguráveis e controlados mecanicamente para redes celulares 5G. 88 f. Dissertação - Telecomunicações, Instituto Nacional de Telecomunicações, 2018.

Tang, F., Kawamoto, Y., Kato, N., Liu, J. (2019). Future Intelligent and Secure Vehicular Network Toward 6G: Machine-Learning Approaches. *Proceedings of the IEEE*, 1–16.

Capmany, J., Novak, D. Microwave photonics combines two worlds. *Nature Photon* 1, 319–330 (2007).

LIMA, E. S. Fronthaul móvel com aplicações de RF no domínio óptico para redes 5G. 109 f. Dissertação - Telecomunicações, Instituto Nacional de Telecomunicações, 2019.
