



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS
DA VIDA E DA NATUREZA (ILACVN)**

ENGENHARIA FÍSICA

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA COM DIFERENTES
GEOMETRIAS PARA O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)**

ISABELLA GRINBERG FRANCELINO

Foz do Iguaçu
2019



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS
DA VIDA E DA NATUREZA (ILACVN)**

ENGENHARIA FÍSICA

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA COM DIFERENTES
GEOMETRIAS PARA O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)**

ISABELLA GRINBERG FRANCELINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. Abraão Jessé Capistrano de Souza

Foz do Iguaçu
2019

ISABELLA GRINBERG FRANCELINO

**DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA COM DIFERENTES
GEOMETRIAS PARA O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GPS)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Abraão Jessé Capistrano de Souza
UNILA

Prof. Dr. Rodrigo Leonardo de Oliveira Basso
UNILA

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Hönnicke
UNILA

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu professor orientador Dr. Abraão Jessé Capistrano de Souza pela constante orientação neste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) pela oportunidade de cursar Engenharia Física.

Ao Parque Tecnológico Itaipu (PTI) pela bolsa de iniciação científica para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores da banca pelas sugestões.

Além disso, agradeço ao meu amigo Égon, ao professor Dr. Oswaldo Barbosa Loureda e aos técnicos dos laboratórios de Física da UNILA pela ajuda neste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Física da UNILA pelos ensinamentos transmitidos.

Aos meus pais e avós pelo apoio durante todos estes anos que estive cursando Engenharia Física.

Agradeço ao meu namorado Paúl pelo apoio e incentivo.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

FRANCELINO, Isabella Grinberg. **Desenvolvimento de antenas de microfita com diferentes geometrias para o Sistema de Posicionamento Global (GPS)**. 2019. 54 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Física) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

RESUMO

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é um sistema de navegação por satélites que permite ao usuário saber sua localização com precisão a qualquer hora e em qualquer lugar da Terra. O GPS é composto por três segmentos, que são o segmento espacial, o segmento terrestre e o segmento do usuário. O segmento espacial é constituído pelos satélites, o segmento terrestre é responsável pelo monitoramento e controle e, por fim, o segmento do usuário corresponde aos receptores GPS, que captam os sinais enviados pelos satélites GPS e determinam a posição. Devido aos avanços na tecnologia, os dispositivos eletrônicos estão apresentando tamanhos cada vez menores. Deste modo, um dos desafios na construção destes dispositivos é a garantia do maior número de serviços em espaços reduzidos, permitindo a total mobilidade. Estes requisitos fazem com que seja necessário o uso de antenas que possam ser integradas em um pequeno espaço. Sendo assim, as antenas de microfita apresentam características que as tornam adequadas para esta finalidade. Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de duas antenas de microfita com geometrias diferentes para receber sinais de satélites GPS. As antenas foram projetadas e simulações foram realizadas com as mesmas. Em seguida, ambas foram construídas e, por fim, foi verificado se estas antenas são adequadas para a aplicação proposta através da realização de testes utilizando um módulo GPS.

Palavras-chave: GPS. Antenas. Microfita. Simulações. Testes.

FRANCELINO, Isabella Grinberg. **Development of microstrip antennas with different geometries for the Global Positioning System (GPS)**. 54 páginas. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Física) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

ABSTRACT

The Global Positioning System (GPS) is a satellite-based navigation system which enables users to determine their location precisely at anytime and anywhere on Earth. The GPS is composed of three segments: the space segment, the ground segment and the user segment. The space segment is given by the satellites, the ground segment is responsible for the monitoring and control and, finally, the user segment corresponds to the GPS receivers, which capture the signals that are sent by the GPS satellites and determine the position. Due to the advances in technology, electronic devices are getting smaller. Therefore, the challenge on the construction of these devices is to provide the larger amount of services in a smaller as possible size. This request makes it necessary to implement antennas that can be integrated in a small space. Thus, microstrip antennas present characteristics that make them suitable for this purpose. This work aims to develop two microstrip antennas with different geometries to receive signals from GPS satellites. The antennas were designed and simulations were made with them. After that, both antennas were built and it was verified if they are appropriate for the proposed application by doing tests with a GPS module.

Keywords: GPS. Antennas. Microstrip. Simulations. Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Segmento espacial do GPS.....	13
Figura 2 – Componentes do sistema NAVSTAR GPS.....	13
Figura 3 – Foguete Delta II.....	14
Figura 4 – Sistema NAVSTAR GPS.....	16
Figura 5 – Esquema para determinação da posição por um GPS.....	17
Figura 6 – Disposição geométrica dos satélites, em uma (a) geometria ideal e (b) uma geometria não ideal.....	19
Figura 7 – Relógio de luz.....	20
Figura 8 – Coordenadas esféricas.....	24
Figura 9 – Carta polar.....	25
Figura 10 – Carta cartesiana.....	25
Figura 11 – Formatos do <i>patch</i> das antenas de microfitas nos respectivos tipos: (a) quadrado, (b) retangular, (c) dipolo, (d) circular, (e) elíptico, (f) triangular, (g) setor circular, (g) anel circular e (i) setor de anel.....	28
Figura 12 – (a) Linha de microfita, (b) linhas de campo elétrico e (c) constante dielétrica efetiva.....	29
Figura 13 – Comprimentos físico e efetivo de um <i>patch</i> retangular de uma antena de microfita.....	31
Figura 14 – Geometria de uma antena de microfita circular no sistema de coordenadas cilíndrico.....	31
Figura 15 – Antena com <i>patch</i> retangular feita no software Feko (vista isométrica)..	33
Figura 16 – Antena com <i>patch</i> retangular feita no software Feko (vista superior).....	34
Figura 17 – Antena com <i>patch</i> circular feita no software Feko (vista isométrica).....	34
Figura 18 – Antena com <i>patch</i> circular feita no software Feko (vista superior).....	35
Figura 19 – <i>Patch</i> retangular.....	36
Figura 20 – Plano de terra da antena com <i>patch</i> retangular.....	36
Figura 21 – Antena com <i>patch</i> retangular com cabo coaxial.....	37
Figura 22 – <i>Patch</i> circular.....	38
Figura 23 – Plano de terra da antena com <i>patch</i> circular.....	38

Figura 24 – Antena com <i>patch</i> circular e cabo coaxial.....	39
Figura 25 – Arduino UNO.....	39
Figura 26 – Módulo GPS GY-GPS6MV1 com uma antena comercial.....	40
Figura 27 – Módulo GPS GY-GPS6MV1 com a antena com <i>patch</i> retangular.....	40
Figura 28 – Módulo GPS GY-GPS6MV1 com a antena com <i>patch</i> circular.....	41
Figura 29 – Simulação do coeficiente de reflexão em função da frequência para a antena retangular.....	42
Figura 30 – Frequência de ressonância da antena retangular.....	43
Figura 31 – Largura de banda da antena retangular.....	43
Figura 32 – Simulação do coeficiente de reflexão em função da frequência para a antena circular.....	44
Figura 33 – Frequência de ressonância da antena com <i>patch</i> circular.....	45
Figura 34 – Largura de banda da antena com <i>patch</i> circular.....	45
Figura 35 – Medidas de latitude, longitude, velocidade e número de satélites obtidas com a antena comercial.....	46
Figura 36 – Medidas de latitude, longitude, velocidade e número de satélites obtidas com a antena com <i>patch</i> retangular.....	47
Figura 37 – Medidas de latitude, longitude, velocidade e número de satélites obtidas com a antena com <i>patch</i> circular.....	47
Figura 38 – Filtro passa-baixo.....	48
Figura 39 – Gráfico do módulo da função de transferência $H(\omega)$	49
Figura 40 – Circuito do filtro passa-baixo utilizado no experimento com as antenas.....	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 SOBRE GPS.....	12
3.1.1 Teoria da Relatividade de Einstein.....	20
3.1.2 GPS e Relatividade.....	22
3.2 ENGENHARIA DE ANTENAS.....	23
3.2.1 Antenas de Microfita.....	27
4 METODOLOGIA.....	33
4.1 SIMULAÇÃO.....	33
4.1.1 Antena Com <i>Patch</i> Retangular.....	33
4.1.2 Antena Com <i>Patch</i> Circular.....	34
4.2 CONSTRUÇÃO DAS ANTENAS.....	35
4.2.1 Materiais.....	35
4.2.2 Antena Com <i>Patch</i> Retangular.....	35
4.2.3 Antena Com <i>Patch</i> Circular.....	37
4.3 TESTES.....	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA ANTENA COM PATCH RETANGULAR.....	42
5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA ANTENA COM <i>PATCH</i> CIRCULAR.....	44
5.3 RESULTADOS DOS TESTES.....	46
5.4 DISCUSSÃO.....	48
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Posicionamento Global, ou *Global Positioning System* (GPS) é um sistema de navegação por satélites que permite ao usuário conhecer sua posição com precisão a qualquer hora, em qualquer lugar da Terra e sob quaisquer condições meteorológicas. O sistema consiste de um conjunto de, no mínimo, vinte e quatro satélites, sendo que cada um circula a Terra duas vezes por dia a uma altitude de aproximadamente 20.200 quilômetros. Além disso, estes satélites estão posicionados em diferentes planos orbitais, de modo que pelo menos quatro destes satélites estejam visíveis de qualquer ponto da Terra a qualquer hora (MIGUENS, 2000; EMBRAPA TERRITORIAL, 2018).

Devidos aos avanços tecnológicos, os dispositivos eletrônicos estão apresentando tamanhos cada vez menores. Com os receptores de sinais de satélites GPS não é diferente. Estes dispositivos são para uso pessoal e devem ter total mobilidade. Sendo assim, é importante que todas as funções do dispositivo possam ser mantidas em um pequeno espaço. Deste modo, as dimensões das antenas que recebem os sinais de satélites GPS devem ser pequenas o suficiente para que seja possível o uso das mesmas em espaços reduzidos (MILLIGAN, 2005; ALFREDO; FIGUEIREDO, 2012).

São muitos os tipos de antenas existentes, entretanto as mais adequadas a esta finalidade são as antenas de microfita. Estas antenas possuem baixo perfil, ocupam pouco espaço, têm baixo peso e apresentam baixo custo de fabricação. São compostas por um *patch* metálico, que é um elemento condutor que pode possuir diversas formas, separado de um plano de terra, que consiste de uma placa condutora paralela ao *patch*, por uma camada de material dielétrico (BALANIS, 2016). A construção deste tipo de antena é feita por meio de técnicas utilizadas na fabricação de circuitos impressos em placas dupla face. O procedimento consiste em desenhar as formas desejadas nas superfícies metálicas da placa utilizando uma tinta resistente ao agente corrosivo, que geralmente é o percloroeto de ferro, e realizar o processo de corrosão do metal nas áreas que não foram cobertas com a tinta (BRAGA, 2011).

Neste trabalho, será apresentado o desenvolvimento de duas antenas de microfita com diferentes geometrias para receber sinais de satélites GPS. No segundo capítulo, são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho. Já no terceiro capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre GPS, relatividade e engenharia de

antenas, com ênfase no estudo de antenas de microfita. No quarto capítulo, é apresentada a metodologia, na qual é explicado o procedimento para simular as antenas, é mostrada a construção das mesmas e são apresentados os procedimentos para realização dos testes. O capítulo 5 apresenta os resultados das simulações e testes e também é feita uma discussão comparando os resultados obtidos para as duas antenas. Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as considerações, perspectivas e conclusões.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é projetar duas antenas com geometrias diferentes para receber sinais de satélites GPS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são fazer o estudo do GPS e das antenas de microfita, estudar as correções relativísticas no GPS, simular as duas antenas projetadas, comparar os resultados das simulações, construir as duas antenas e testá-las.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SOBRE GPS

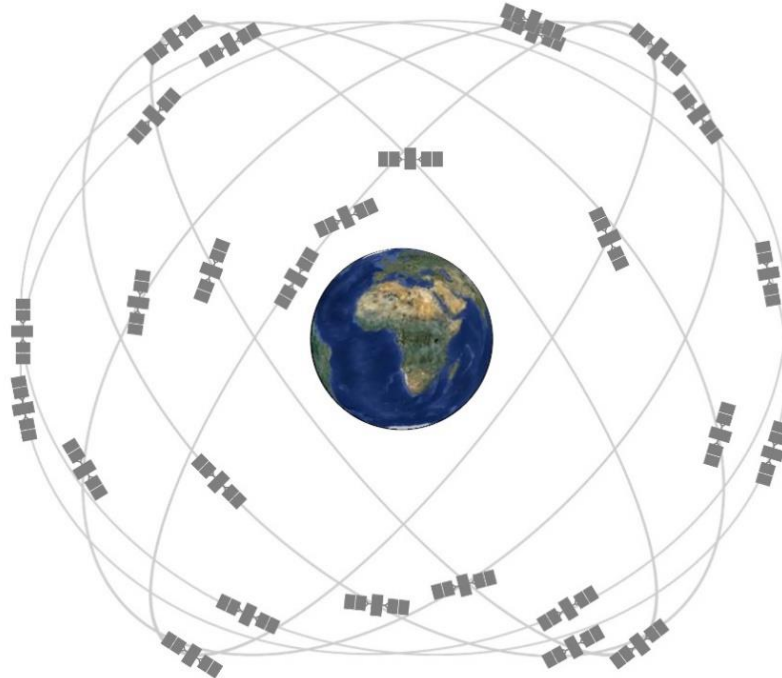
Sistemas de navegação por satélite são sistemas que permitem estabelecer o posicionamento de um objeto na superfície da Terra por meio de satélites artificiais que orbitam a Terra. O primeiro sistema de navegação deste tipo foi o chamado sistema TRANSIT, ou NAVSAT (*Navy Navigation Satellite System*), que entrou em funcionamento na década de 1960. Este sistema possuía uma pequena quantidade de satélites com órbitas muito baixas e era baseado em medidas do deslocamento Doppler de frequências relativamente baixas. Com isso, o sistema possuía problemas de propagação. Erros na posição determinada poderiam ser causados por pequenos movimentos do receptor. Além disso, sua capacidade era apenas bidimensional e periódica (MIGUENS, 2000).

No ano de 1973, nos Estados Unidos, foi iniciado o desenvolvimento de um sistema de navegação por satélites de segunda geração chamado de GPS, ou NAVSTAR GPS (*Navigation Satellite by Time and Ranging – Global Positioning System*). Este sistema é capaz de fornecer a localização do usuário de forma precisa em qualquer lugar da Terra, a qualquer hora e sob quaisquer condições meteorológicas. O sistema é operado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos e seu desenvolvimento custou mais de 12 bilhões de dólares. Inicialmente, seu uso era apenas militar. Mais tarde se tornou disponível para o uso civil. A mensagem enviada por um satélite é codificada em um sinal, que é transmitido para o receptor GPS, onde é decodificado, possibilitando a recuperação da mensagem. Os sinais com os quais os satélites GPS operam estão na faixa de radiofrequência (RF) (MIGUENS, 2000; EMBRAPA TERRITORIAL, 2018).

O sistema possui três componentes principais, que são o segmento espacial (Figura 1), composto pelos satélites, o segmento terrestre, responsável pelo monitoramento e controle, e o segmento do usuário, que corresponde aos receptores GPS. Estes três segmentos operam em constante interação, como mostra a Figura 2, na qual um satélite transmite sinais de radiofrequência e está constantemente se comunicando com o segmento terrestre que, por sua vez, provê a sincronização dos relógios e as efemérides dos satélites, que são as coordenadas que definem a posição do satélite. Já os receptores dos usuários determinam a posição, o rumo e a

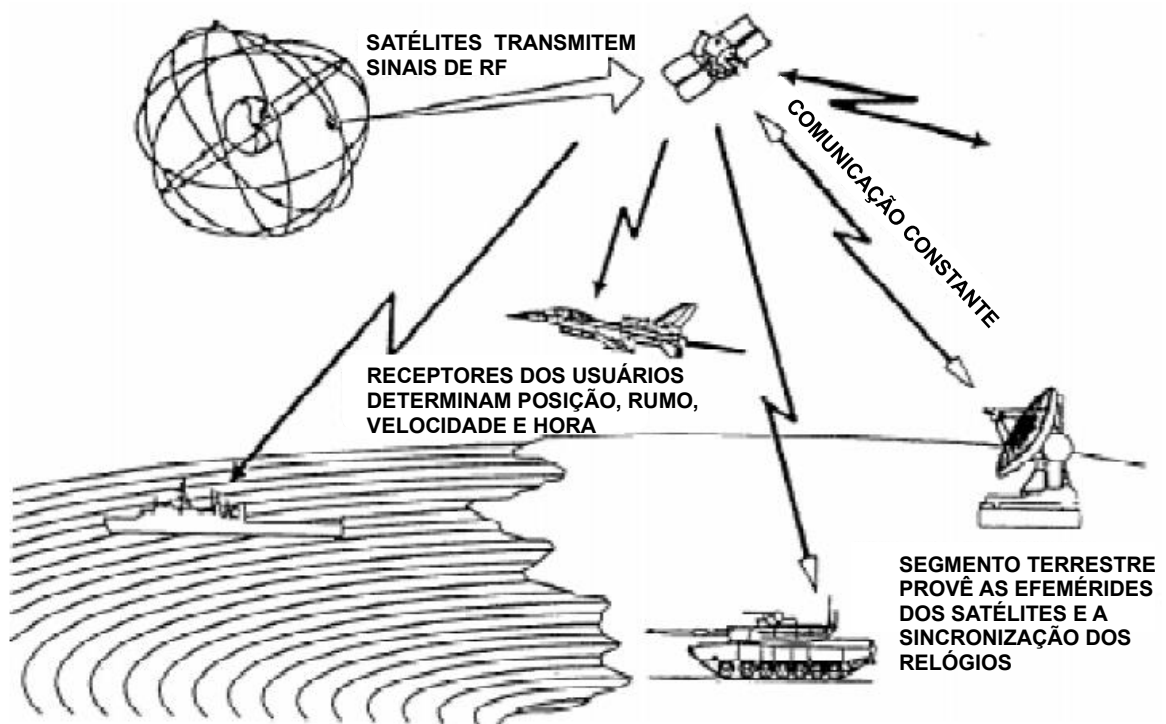
velocidade do usuário (MIGUENS, 2000).

Figura 1 – Segmento espacial do GPS.



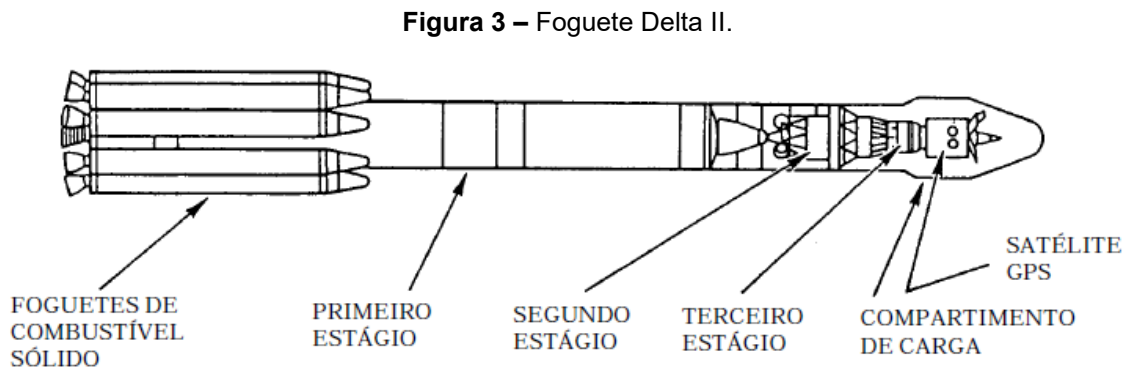
Fonte: GPS.GOV.

Figura 2 – Componentes do sistema NAVSTAR GPS.



Fonte: Adaptado de MIGUENS (2000).

Os satélites GPS são classificados em blocos. Os modelos preliminares, que fazem parte do Bloco 1, começaram a ser lançados no ano de 1978 pelo ônibus espacial da NASA. O primeiro satélite do Bloco 2 foi lançado em fevereiro de 1989, três anos após o acidente com o ônibus espacial *Challenger*, que ocorreu em janeiro de 1986. Os satélites Bloco 2 foram lançados por foguetes Delta II, que foram desenvolvidos justamente para esta finalidade. A Figura 3 mostra um foguete Delta II, e suas respectivas partes de composição, que são a câmara de combustão de propelente sólido, os estágios, que compõem o corpo do foguete, e a ogiva, que é o compartimento de carga, onde se situa o satélite GPS (MIGUENS, 2000).



Fonte: MIGUENS (2000).

Desde então, outros satélites foram lançados, como os do Bloco 2A, Bloco 2R e Bloco 2R-M. Atualmente, o GPS é composto por trinta e um satélites operacionais, sendo que o sistema requer que estejam disponíveis, no mínimo, vinte e quatro satélites. Além disso, há outros sistemas de navegação por satélite em operação, como o sistema russo GLONASS, ou em desenvolvimento, como o sistema chinês COMPASS e o sistema europeu GALILEO (EMBRAPA TERRITORIAL, 2018; GPS.GOV, 2019).

Os satélites GPS possuem grandes painéis solares, que fornecem a energia utilizada pelos mesmos. Além disso, estes satélites possuem baterias a bordo, que são carregadas durante o período em que os painéis estão expostos ao Sol, o que permite a operação nos períodos em que os satélites se encontram na sombra da Terra. Há também uma quantidade limitada de propelente a bordo do satélite, que é utilizada apenas em situações nas quais o satélite precisa realizar manobras na órbita ou entre órbitas. Estas manobras devem ser realizadas com um gasto limitado de

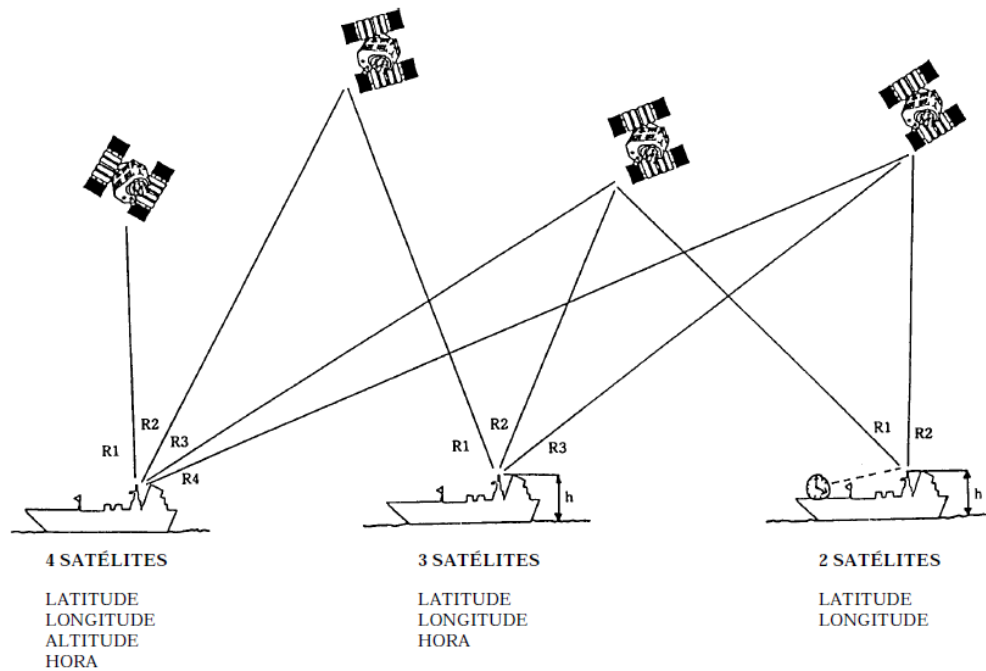
combustível, e por isso as mudanças de órbitas podem demorar semanas ou até meses. Muitas vezes, durante os períodos em que ocorrem estas mudanças de órbitas, o desempenho do satélite fica degradado (MIGUENS, 2000).

Dado que as órbitas dos satélites GPS são elevadas, as mesmas estão livres da atmosfera e de seus efeitos, indicando que as previsões destas órbitas podem ser bastante rigorosas. Apesar do modelo matemático das órbitas ser bastante preciso, os satélites GPS são acompanhados constantemente por estações de monitoramento. Este é um dos motivos pelos quais não são utilizadas órbitas geossíncronas no GPS. Como o tempo para que os satélites GPS orbitem em torno da Terra é de aproximadamente 12 horas, os mesmos passam duas vezes por dia sobre as estações de monitoramento, o que permite medir de forma precisa sua posição, altitude e velocidade. É possível que ocorram pequenas variações nas órbitas, que podem ser causadas tanto pela pressão da radiação solar sobre o satélite quanto pela atração gravitacional da Lua ou do Sol. Estas variações são chamadas de erros de efemérides e são transmitidas para os satélites GPS, que passam a considerá-las em suas emissões (MIGUENS, 2000).

O posicionamento obtido através do uso do GPS é tridimensional, ou seja, é possível obter informação da latitude, longitude e altitude. Além disso, também é possível obter o rumo, a velocidade e o tempo com alta precisão. A constelação deve possuir no mínimo vinte e quatro satélites e o sistema deve garantir que pelo menos quatro destes satélites estejam disponíveis com probabilidade de 95%, considerando uma altura maior do que a elevação mínima de cinco graus, que é necessária para uma boa recepção. A órbita dos satélites é elevada, com altitude de aproximadamente 20.200 quilômetros e período orbital de 11 horas e 58 minutos. Há seis planos orbitais com inclinação de 55° em relação à linha do Equador (MIGUENS, 2000).

Para determinar a localização através do GPS, o receptor deve medir as distâncias a vários satélites do sistema. Estas distâncias são determinadas através do intervalo de tempo que o sinal demora para percorrer o trajeto entre os satélites e o receptor GPS. Além de medir as distâncias, é necessário conhecer as posições dos satélites GPS para que seja possível determinar a posição do receptor. Para obter uma posição tridimensional e informação precisa do tempo, são necessários quatro satélites. A Figura 4 mostra o sistema NAVSTAR GPS e as informações de posição que podem ser obtidas de acordo com o número de satélites (MIGUENS, 2000).

Figura 4 – Sistema NAVSTAR GPS.



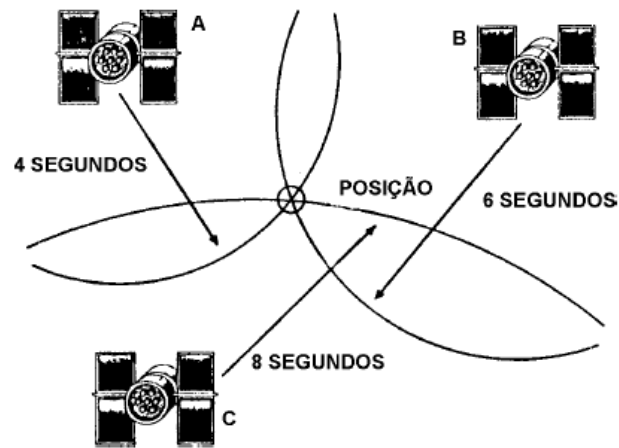
Fonte: MIGUENS (2000).

As distâncias entre o receptor e os satélites são utilizadas como raios de esferas, cada uma com um satélite como centro. A posição do usuário é o ponto de interseção destas esferas. Para determinar quanto tempo o sinal demora para percorrer estas distâncias, é necessário que o receptor conheça exatamente o instante em que o satélite emitiu o sinal pois, desta forma, é possível medir a diferença de tempo entre a transmissão e a recepção. O GPS baseia-se no princípio de que há uma sincronização entre o satélite e o receptor, de modo que o mesmo código seja gerado por ambos exatamente no mesmo instante. Deste modo, ao receber um código transmitido por um satélite, o equipamento mede a diferença de tempo entre o instante em que recebeu o sinal e o instante em que o mesmo código foi gerado pelo receptor (MIGUENS, 2000).

A Figura 5 mostra um esquema para determinar a posição utilizando três satélites. Neste exemplo, o intervalo de tempo medido entre a transmissão do sinal do satélite A e a recepção foi de quatro segundos. Com o valor deste intervalo e da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, que é de aproximadamente 300.000 km/s, é possível determinar a distância entre o receptor e o satélite A. O mesmo procedimento deve ser feito com relação aos outros dois satélites. Após determinar as três distâncias, o receptor é capaz de calcular a posição na superfície

da Terra (MIGUENS, 2000).

Figura 5 – Esquema para determinação da posição por um GPS.



Fonte: MIGUENS (2000).

Para uma sincronização perfeita, tanto os satélites quanto os receptores GPS deveriam dispor de padrões atômicos de tempo. Os satélites possuem relógios atômicos, mas os receptores não, dado que o custo seria muito alto. Sendo assim, os receptores utilizam um oscilador a cristal, que é um componente eletrônico que utiliza a ressonância de um cristal de material piezoelétrico para criar um sinal com frequência bastante precisa. O erro de tempo que é obtido ao medir a duração do trajeto entre a emissão e a recepção do sinal e o erro da variação da velocidade de propagação do sinal resultam em um pequeno erro de distância. As distâncias obtidas são denominadas pseudo-distâncias ou distâncias aparentes. Quando estas distâncias não se cruzam em um ponto, o computador do receptor faz um ajuste nas mesmas em incrementos iguais, estimando a posição (MIGUENS, 2000).

O receptor considera o seu próprio movimento e faz uma comparação das frequências dos sinais de satélites com um sinal de referência que é gerado internamente pelo mesmo. A partir do efeito Doppler, o receptor pode calcular a sua velocidade relativa para cada um dos satélites envolvidos, e o cálculo para determinar a posição é feito novamente até que seja produzido um ponto. Além da distância aos satélites, o receptor GPS precisa conhecer também as posições dos satélites no instante da observação. O sinal que é transmitido contém duas partes, que são o código digital, que é único para cada satélite e é utilizado para identificação. Superposto a este código, há uma mensagem de navegação, que dá informação

atualizada sobre a órbita do satélite (MIGUENS, 2000).

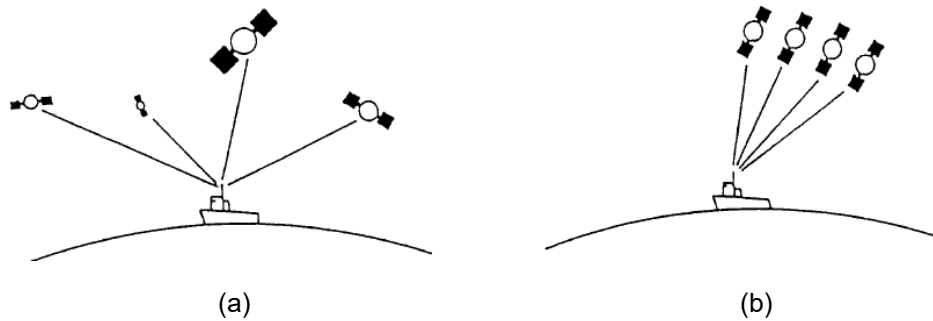
Os satélites GPS transmitem continuamente em duas frequências, denominadas L1 e L2, cujos valores são 1575,42 MHz e 1227,60 MHz, respectivamente, e ambas são múltiplas de uma frequência fundamental cujo valor é 10,23 MHz. O uso de duas frequências permite que perturbações na propagação do sinal possam ser determinadas e eliminadas pelos receptores, o que possibilita um cálculo mais preciso tanto das distâncias entre o receptor e os satélites quanto da velocidade de propagação. Os sinais são modulados por mensagens de navegação de 30 segundos, sendo que os primeiros 18 segundos contêm informações das efemérides do satélite, o que permite definir de forma precisa a sua posição em função do tempo, e os outros 12 segundos contêm informações sobre as órbitas e as condições de operação de todos os satélites do sistema. O sinal de cada satélite é transmitido na forma de código e com uma modulação diferente, o que permite que o receptor identifique o satélite. Um destes códigos é chamado de código de precisão (P code), utilizado para serviço de posicionamento preciso, e o outro é chamado de código de aquisição inicial (C/A - *coarse acquisition code*), utilizado para serviço de posicionamento padrão. A frequência L1 contém ambas as modulações, enquanto que a frequência L2 contém somente o código de precisão (MIGUENS, 2000).

Entre as fontes de erro dos GPS, destacam-se a disponibilidade seletiva, os atrasos atmosféricos, os erros nos relógios dos satélites GPS e os erros nos receptores GPS. Ao passar pela ionosfera, que é uma camada da atmosfera que contém partículas eletricamente carregadas, as ondas de rádio sofrem refração, causando um atraso no sinal do satélite. Na troposfera, que é a camada atmosférica mais próxima da superfície terrestre, os sinais GPS também são afetados devido à quantidade significativa de vapor d'água presente nesta camada (MIGUENS, 2000).

A precisão da posição fornecida pelo sistema GPS depende também da geometria da situação, ou seja, da disposição geométrica dos satélites. É utilizado o princípio de Diluição da Precisão, ou *Dilution of Precision* (DOP), segundo o qual a localização dos satélites em relação ao receptor GPS afeta a precisão da posição. Se os satélites estiverem espalhados em todas as direções, como mostra a Figura 6(a), a precisão é garantida, dado que as medidas são feitas de várias direções e os ângulos entre os satélites e o receptor são grandes. Já na situação mostrada na Figura 6(b), não há precisão na posição, uma vez que todos os satélites estão em uma mesma região, com ângulos pequenos entre os satélites e o receptor, o que faz com

que a triangulação não seja ideal (MIGUENS, 2000).

Figura 6 – Disposição geométrica dos satélites, em uma (a) geometria ideal e (b) uma geometria não ideal.



Fonte: MIGUENS (2000).

Para que sejam obtidas posições contínuas e com elevada precisão, é necessário um receptor com, no mínimo, quatro canais. Entretanto, muitas aplicações não requerem um elevado grau de precisão, podendo ser suficiente um receptor monocanal, que é mais econômico. Um receptor monocanal faz as medidas de distâncias para os quatro satélites diferentes sequencialmente, um de cada vez, antes de poder calcular a posição. A duração total desta operação é de 2 a 30 segundos, o que pode ser suficiente em alguns casos. Contudo, este receptor não permite um bom monitoramento de velocidade. Um receptor GPS com três canais, por sua vez, permite que a posição seja atualizada de forma contínua e pode acompanhar, simultaneamente, até oito satélites. Para que um receptor GPS possa operar, é necessário que o mesmo possua todas as informações sobre os satélites em sua memória. Estas informações são memorizadas no início da operação do equipamento e são chamadas de almanaque (MIGUENS, 2000).

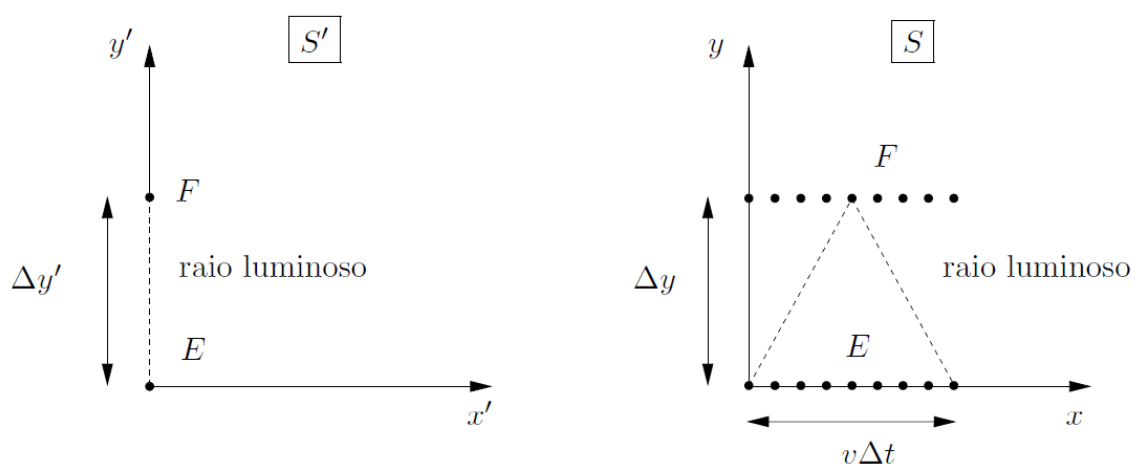
Existe uma diferença de potencial gravitacional não negligenciável entre os satélites GPS e os usuários na superfície terrestre. Esta diferença, combinada com outros fatores, como as altas velocidades dos satélites GPS, a rotação da Terra e a precisão de nanossegundos das medidas de tempo, faz com que os chamados efeitos relativísticos sejam significativos. A sincronização de relógios que se encontram na superfície da Terra e nas órbitas dos satélites GPS deve levar em consideração que o tempo próprio de cada relógio envolvido difere ligeiramente devido a estes efeitos (CARARO, 2006).

3.1.1 Teoria da Relatividade de Einstein

Teoria da Relatividade é o conjunto de duas teorias científicas, que são a Relatividade Restrita (ou Especial) e a Relatividade Geral. A teoria da Relatividade Especial foi publicada no ano de 1905 pelo físico alemão Albert Einstein e estuda referenciais inerciais, ou seja, referenciais onde as leis de Newton são válidas. Há dois postulados nesta teoria, que são o postulado da relatividade, segundo o qual as leis da física são as mesmas para observadores em todos os referenciais inerciais, e o postulado da velocidade da luz, segundo o qual a luz possui velocidade invariante no vácuo igual a c em todas as direções e em todos os referenciais inerciais (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Uma consequência do postulado da velocidade da luz é que relógios em movimento em um referencial inercial atrasam-se em relação a relógios que estão parados. Para o cálculo do atraso em um relógio em movimento, de acordo com a Teoria da Relatividade Restrita, considera-se um referencial inercial S' que se move com velocidade v ao longo do eixo x de um outro referencial S . Em S' , há um relógio de luz, formado por dois espelhos (E e F), um na origem e outro em um ponto do eixo y , como mostra a Figura 7 (NATÁRIO, 2015).

Figura 7 – Relógio de luz.



Fonte: NATÁRIO (2015).

O intervalo de tempo em que um sinal luminoso que parte do espelho E , é refletido pelo espelho F e regressa ao espelho E no referencial S' é dado por:

$$\Delta t' = \frac{2\Delta y'}{c}, \quad (1)$$

onde $\Delta y'$ é a distância entre os espelhos em S' . No referencial S , os espelhos estão em movimento e o sinal luminoso percorre uma distância diferente. Como a velocidade da luz é a mesma nos dois referenciais, usando o Teorema de Pitágoras, temos:

$$(\Delta y)^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2, \quad (2)$$

onde Δy é a distância entre os espelhos no referencial S . Se a distância entre os espelhos medida nos dois referenciais é a mesma, $\Delta y = \Delta y'$, obtemos:

$$\left(\frac{c\Delta t'}{2}\right)^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 \quad (3)$$

Portanto, o tempo medido pelo observador em S' é dado por:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (4)$$

Esta é a fórmula da dilatação do tempo. O observador em S' mede um intervalo de tempo menor do que um observador em S (NATÁRIO, 2015).

Na tentativa de incorporar a gravitação à Teoria da Relatividade, Einstein desenvolveu a chamada Teoria da Relatividade Geral, que foi publicada no ano de 1915. De acordo com esta teoria, o ritmo de um relógio depende não só da sua velocidade mas também do local em que se encontra, ou seja, relógios que estão em pontos mais baixos de um campo gravitacional atrasam-se em relação a relógios situados em pontos mais altos (NATÁRIO, 2015).

3.1.2 GPS e Relatividade

Para que se obtenha a posição com precisão por meio do GPS, as medidas de tempo devem ser precisas. Os satélites GPS orbitam a Terra a uma alta velocidade e em um ponto elevado do campo gravitacional da Terra, ou seja, há uma diferença de potencial não negligenciável entre satélites e usuários. Tudo isso faz com que ambos os efeitos previstos por Einstein sejam significativos e tenham que ser levados em consideração. Os erros relativísticos, apesar de serem muito pequenos quando comparados com outros tipos de erro envolvidos, são cumulativos em função da passagem do tempo. Deste modo, o GPS não seria operacional se os efeitos da relatividade não fossem considerados (CARARO, 2006).

Os satélites GPS possuem relógios atômicos a bordo, que são precisos e altamente estáveis. Estes relógios funcionam com base na frequência de transições eletrônicas em regiões específicas do espectro eletromagnético. A frequência esperada nominal que os relógios dos satélites GPS devem possuir é de 10,23 MHz. Devido aos efeitos relativísticos, os relógios dos satélites GPS marcham mais rapidamente ao alcançar a posição orbital final. Para que estes relógios forneçam a frequência esperada nominal após entrarem em órbita, os mesmos deverão ser ajustados, ainda em solo, para apresentar uma frequência um pouco menor f , que pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$f = f_0 \left[1 - \frac{\mu}{c^2} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{3}{2a} \right) \right], \quad (5)$$

onde f_0 é a frequência esperada nominal, $\mu = 3,986004418 \times 10^{14} m^3/s^2$, c é a velocidade da luz, $R_0 = 6363672,560 m$ e a é o semi-eixo maior da órbita do satélite GPS (CARARO, 2006).

O valor de a é admitido como sendo igual ao valor nominal 26561400 m. Portanto, para $f_0 = 10,23 MHz$, o valor de f deve ser igual a 10,22999999543 MHz. É importante considerar que o semi-eixo maior dos satélites GPS não corresponde exatamente ao valor nominal pois sua órbita final não é perfeitamente conhecida antes de ser estabelecida, o que faz com que os relógios dos satélites GPS apresentem ainda um pequeno erro residual (CARARO, 2006).

3.2 ENGENHARIA DE ANTENAS

Antenas são, de acordo com o Dicionário Webster, “um dispositivo metálico para irradiar ou receber ondas de rádio”. De acordo com as Definições Padrões de Termos para Antenas do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), uma antena é “um meio para irradiar ou receber ondas de rádio”. Em outras palavras, uma antena é a estrutura transicional entre espaço livre e uma linha de transmissão, que deve ter a forma de uma linha coaxial ou um guia de ondas, e é utilizada para transportar energia eletromagnética da fonte transmissora para a antena, ou da antena para o receptor. O primeiro caso trata-se de uma antena transmissora, enquanto que o segundo caso trata-se de uma antena receptora (BALANIS, 2016).

As antenas apresentam parâmetros fundamentais, que permitem caracterizar o desempenho de vários aspectos das mesmas. Exemplos destes parâmetros são a largura de banda, o coeficiente de reflexão, a eficiência, diagrama de irradiação, a diretividade, o ganho, a impedância de entrada. Todos estes parâmetros são descritos a seguir.

- Largura de banda

A largura de banda é definida como a gama de frequências em ambos os lados de uma frequência central onde as características de uma antena, tais como a impedância de entrada, o ganho, a diretividade, a eficiência de irradiação, dentre outras, possuem um valor aceitável em relação aos valores na frequência central (MOURA, 2015).

- Coeficiente de Reflexão (Γ)

O coeficiente de reflexão de uma antena representa a quantidade de potência que é refletida pela antena. Como as antenas são projetadas para que tenham poucas perdas, a maior parte da potência entregue à antena é irradiada (ANTENNA THEORY, 2015).

- Eficiência

A eficiência de uma antena fornece uma medida das perdas nos terminais e na

estrutura da antena. Estas perdas podem ser devidas a reflexões causadas pela desadaptação entre a linha de transmissão e a antena ou por perdas nos condutores e dielétricos do sistema de transmissão/recepção. A eficiência total é dada pela equação:

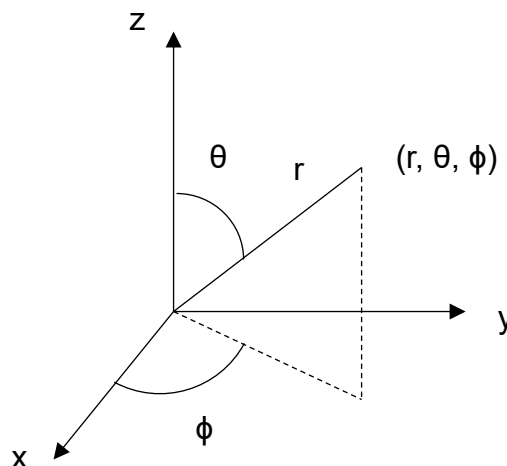
$$e_0 = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2), \quad (6)$$

onde e_{cd} é a eficiência de irradiação e Γ é o coeficiente de reflexão (MOURA, 2015).

- Diagrama de Irradiação

O diagrama de irradiação é uma representação gráfica do comportamento da antena em relação a sua irradiação. Este diagrama é, muitas vezes, encontrado nos planos horizontal e vertical, apesar da irradiação da antena ser tridimensional. Para representar este diagrama, deve-se utilizar a convenção para o sistema de coordenadas esféricas. A Figura 8 mostra uma representação destas coordenadas (CAMPISTA, 2003).

Figura 8 – Coordenadas esféricas.



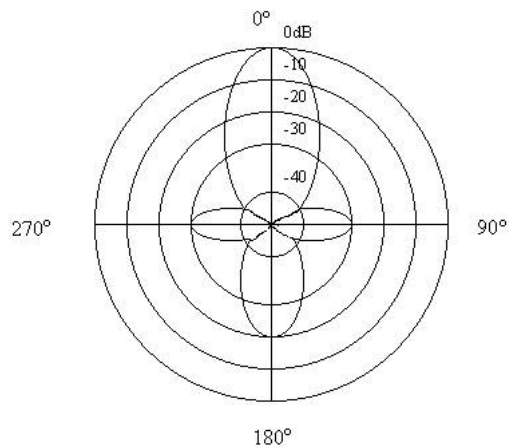
Fonte: A autora (2019).

O ângulo ϕ é chamado de ângulo azimutal, θ é o ângulo polar e r é o raio. O procedimento para traçar o diagrama horizontal da antena consiste em manter fixos o raio e o ângulo θ em $\pi/2$ e variar a componente ϕ de 0 a 2π . Para traçar o diagrama

vertical, é necessário fixar um raio e variar a componente θ de 0 a π , mantendo o ângulo ϕ fixo em $\pi/2$ e também variar θ de 0 a π para ϕ fixo em $-\pi/2$ (CAMPISTA, 2003).

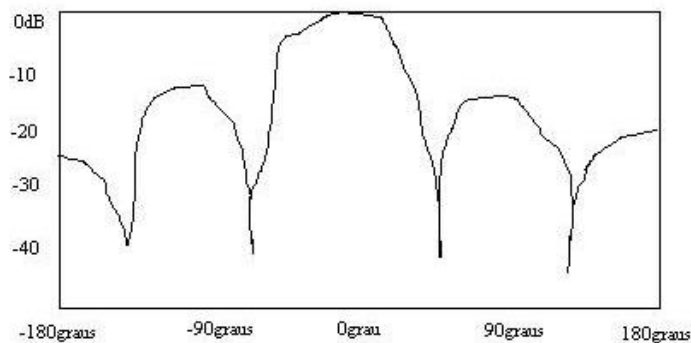
O diagrama também pode ser representado por meio de cartas polares ou cartesianas, nas quais há a representação da variação da potência irradiada pela antena em dB de acordo com a variação do ângulo ϕ de 0 a 2π . A Figura 9 mostra uma carta polar de uma antena direcional qualquer, enquanto que na Figura 10 é apresentada uma carta cartesiana, na qual o lobo maior é onde se concentra a maior parte da energia (CAMPISTA, 2003).

Figura 9 – Carta polar.



Fonte: CAMPISTA (2003).

Figura 10 – Carta cartesiana.



Fonte: CAMPISTA (2003).

Em relação à direção de irradiação das antenas, é possível classificá-las com isotrópicas, direcionais e omnidirecionais. Uma antena isotrópica é uma antena sem perdas que irradia igualmente para todas as direções. Mesmo sendo um caso ideal

que não é fisicamente realizável, este tipo de antena é tomado como referência para expressar as propriedades de diretividade das antenas. Já uma antena direcional pode irradiar ou receber ondas eletromagnéticas de forma mais eficiente em algumas direções. Por fim, uma antena omnidirecional é aquela que possui um diagrama de irradiação não direcional em um plano e um diagrama de irradiação direcional em qualquer plano perpendicular a este (MOURA, 2015).

- **Diretividade**

A diretividade de uma antena é a razão entre a intensidade de irradiação em uma dada direção e a intensidade de irradiação média em todas as direções e pode ser calculada a partir da equação:

$$D = \frac{U}{U_0}, \quad (7)$$

onde U é a intensidade de irradiação em uma dada direção e U_0 é a intensidade de irradiação de uma antena isotrópica (MOURA, 2015).

- **Ganho**

Há dois tipos de ganho, que são o ganho absoluto e o relativo. O ganho absoluto de uma antena é a razão entre a intensidade em uma dada direção e a intensidade de irradiação da antena se a potência aceita por esta fosse isotropicamente irradiada. Já o ganho relativo é a razão entre o ganho de uma antena e o ganho de uma antena que é tomada como referência, sendo que a potência de entrada deverá ser a mesma para ambas. Na maioria das vezes, a antena de referência é uma antena isotrópica sem perdas (MOURA, 2015).

- **Impedância de entrada**

A impedância de entrada é a impedância apresentada por uma antena à linha de transmissão ou à estrutura de acoplamento com o transmissor. Alguns dos fatores que determinam esta impedância são a forma da antena, os materiais de que a antena é composta e a frequência do sinal de operação da mesma (TELECO, 2019).

3.2.1 Antenas de Microfita

Atualmente, muito se tem estudado sobre as antenas de microfita, que são uma inovação na teoria e desenvolvimento de antenas. Surgiram em decorrência da evolução dos sistemas eletrônicos, que estão apresentando tamanhos cada vez menores devido aos avanços da tecnologia. Estas antenas possuem pequenas dimensões, baixo peso, baixo custo de fabricação e podem ser utilizadas em aplicações de altas frequências. Na década de 50 foram publicados os primeiros trabalhos sobre este tipo de antena, mas as pesquisas científicas sobre o tema foram iniciadas apenas na década de 70 (SILVEIRA, 2016).

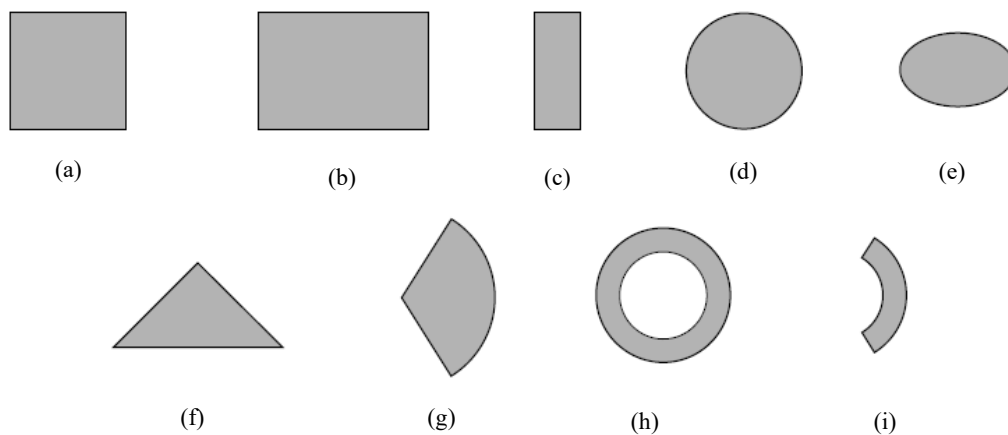
Antenas de microfita são encontradas em diversos sistemas de micro-ondas utilizados atualmente. Podem ser utilizadas em satélites, aeronaves de alta performance, espaçonaves e mísseis, onde peso, tamanho, fácil instalação e perfil aerodinâmico devem ser levados em consideração. Outras aplicações das antenas de microfita incluem os aparelhos móveis de radiofrequência e comunicações sem fio. Por possuírem baixo perfil, estas antenas são adequadas tanto para superfícies planares quanto não-planares, e sua construção é simples e de baixo custo, já que utiliza modernas tecnologias de circuito impresso. Além disso, são muito versáteis em termos de polarização, frequência ressonante e impedância (BALANIS, 2016; SILVEIRA, 2016).

As antenas de microfita são compostas por duas placas condutoras paralelas, separadas por uma camada de material dielétrico, também chamada de substrato. Uma das placas é o elemento irradiador, também chamado de *patch*, enquanto que a outra placa é o plano de terra. Além disso, há um alimentador por onde entra o sinal recebido ou que será irradiado (MILLIGAN, 2005; BALANIS, 2016).

A constante dielétrica de um substrato é um parâmetro que influencia na frequência de ressonância, na largura de banda e nas dimensões de uma antena. Um substrato cuja constante dielétrica apresenta um valor mais baixo possibilita maiores valores de potência irradiada e maiores larguras de banda. Entretanto, por adquirir excitação de ondas de superfície e radiações indesejáveis, é utilizado somente para antenas com dimensões maiores. Já um substrato com uma constante dielétrica mais alta possui baixa eficiência e uma estreita largura de banda, porém permite que as antenas possuam tamanhos reduzidos (SILVEIRA, 2016).

A alimentação da antena pode ocorrer de várias formas, como através de um cabo coaxial, de uma linha de fenda ou de uma linha de microfita. O *patch* pode apresentar geometria quadrada, retangular, circular, elíptica, triangular, fractal, dentre outras. A Figura 11 mostra algumas destas geometrias (BALANIS, 2016).

Figura 11 – Formatos do *patch* das antenas de microfita nos respectivos tipos: (a) quadrado, (b) retangular, (c) dipolo, (d) circular, (e) elíptico, (f) triangular, (g) setor circular, (g) anel circular e (i) setor de anel.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2016).

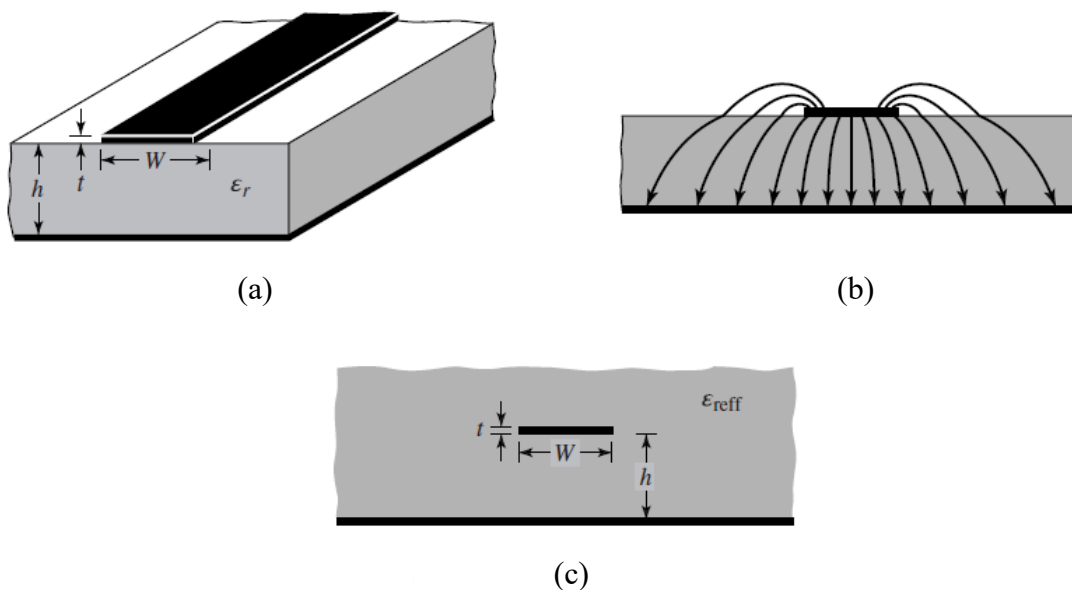
Existem diversos métodos de análise para modelar uma antena de microfita, sendo que os mais utilizados são os modelos aproximados, que são pouco precisos, e os modelos de onda completa, que são considerados bastante precisos. Ao utilizar os modelos aproximados, a forma como a antena irradia é simplificada, de modo que alguns fenômenos, tais como ondas de superfície e dispersão, não sejam considerados. Exemplos de modelos aproximados são o modelo da linha de transmissão e o modelo da cavidade. O modelo de linha de transmissão é um método simples e é indicado apenas para antenas de microfita com *patch* quadrado ou retangular, mostrados nas Figuras 11(a) e 11(b), respectivamente. Já o modelo da cavidade pode ser utilizado para antenas de microfita com *patch* de qualquer geometria. Este modelo considera a antena de microfita como uma cavidade cercada por paredes magnéticas nas laterais e por paredes elétricas no topo e na base. Os modelos de onda completa, por sua vez, utilizam formulações matemáticas mais sofisticadas, não consideram o método empírico e exigem um maior esforço computacional. Uma das formas de se aplicar estes modelos é analisar o domínio

espectral. Os métodos de análise neste domínio são numericamente precisos e mais simples do que outros métodos no domínio do espaço. A escolha do modelo a ser utilizado depende não só do problema a ser resolvido como também da necessidade de uma maior precisão nos resultados (BALANIS, 2016; SILVEIRA, 2016).

Algumas desvantagens operacionais de antenas de microfita são a sua baixa eficiência, baixa potência e largura de banda estreita. Em algumas aplicações, como sistemas de segurança governamentais, larguras de banda estreita são desejadas. Entretanto, há métodos tais como o aumento da espessura do substrato que podem ser usados para estender a eficiência e a largura de banda. No entanto, conforme a espessura aumenta, ondas de superfície são introduzidas, extraindo potência do total disponível para irradiação direta. As ondas de superfície viajam pelo substrato e são espalhadas nas descontinuidades da superfície, tais como o truncamento do dielétrico e do plano de terra, degradando o padrão de polarização da antena (BALANIS, 2016).

Como as dimensões do *patch* são finitas ao longo do comprimento (L) e da largura (w), os campos nos extremos do *patch* sofrem o chamado efeito de franja (*fringing effect*), o qual influencia a frequência de ressonância da antena. Como algumas ondas viajam no substrato e outras no ar, uma constante dielétrica efetiva ϵ_{reff} é introduzida. A Figura 12 mostra este efeito (BALANIS, 2016).

Figura 12 – (a) Linha de microfita, (b) linhas de campo elétrico e (c) constante dielétrica efetiva.



Fonte: Adaptado de BALANIS (2016).

Para o projeto de uma antena de microfita retangular, é necessário especificar os valores da constante dielétrica do substrato (ϵ_r), da frequência de ressonância (f_r) e da espessura do substrato (h). Em seguida, deve-se determinar w , a partir da equação:

$$w = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (8)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e ϵ_0 é permissividade elétrica do vácuo (BALANIS, 2016).

Após o cálculo do valor de w , é possível determinar ϵ_{reff} utilizando a equação:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Por causa dos efeitos de franja, eletricamente o *patch* parece maior do que suas dimensões físicas. O comprimento L do retângulo é estendido em cada extremidade por uma distância ΔL (BALANIS, 2016). Deste modo, o comprimento efetivo L_{eff} é dado pela equação:

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (10)$$

Utilizando o valor de ϵ_{reff} calculado a partir da equação (9), deve-se determinar ΔL por meio da seguinte equação:

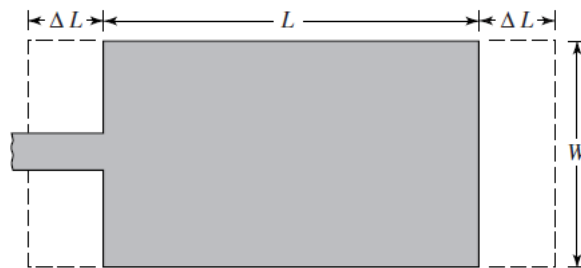
$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{w}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{w}{h} + 0,8\right)} \quad (11)$$

Por fim, deve-se determinar o valor do comprimento L , dado pela equação:

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{r\text{eff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (12)$$

A Figura 13 mostra o comprimento físico e o comprimento efetivo do *patch* retangular.

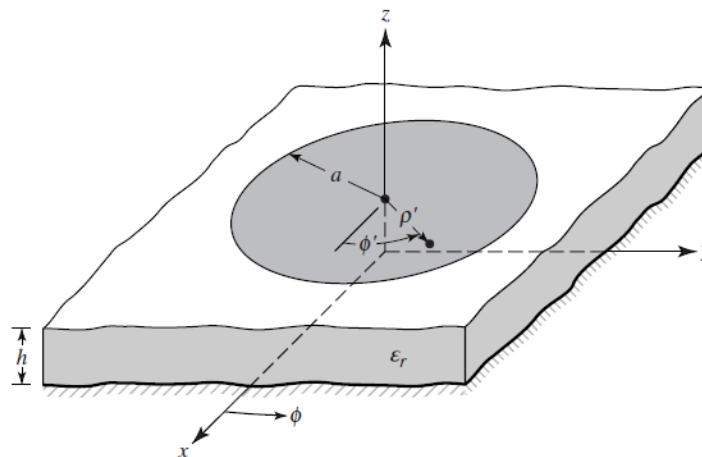
Figura 13 – Comprimentos físico e efetivo de um *patch* retangular de uma antena de microfita.



Fonte: BALANIS (2016).

Outro formato de antena de microfita é o circular. A geometria de uma antena desse tipo é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Geometria de uma antena de microfita circular no sistema de coordenadas cilíndrico.



Fonte: BALANIS (2016).

Para o projeto de uma antena de microfita circular, deve-se conhecer os valores da frequência, de ϵ_r , f_r , e h .

No caso da antena com *patch* retangular, o efeito de franja faz com que o *patch*

seja eletricamente maior, e isso é levado em consideração adicionando-se um fator de correção no comprimento. De modo semelhante, no caso de uma antena com *patch* circular, deve ser feita uma correção utilizando um raio efetivo para substituir o raio a (BALANIS, 2016).

O raio efetivo é dado pela equação:

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{\pi a}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (13)$$

e o raio do *patch* circular é calculado a partir da equação:

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{1/2}}, \quad (14)$$

onde F é dado por (BALANIS, 2016):

$$F = \frac{8,791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}}. \quad (15)$$

4 METODOLOGIA

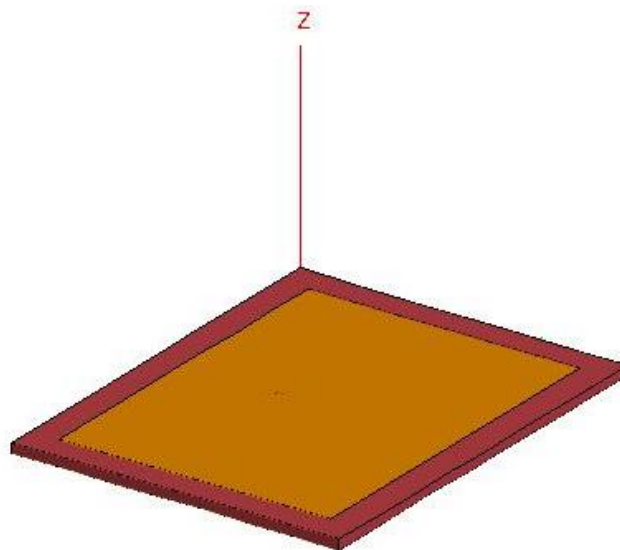
4.1 SIMULAÇÃO

Foram calculadas as dimensões das duas antenas (uma com *patch* retangular e a outra com *patch* circular) para uma frequência de ressonância igual à frequência L1 do GPS, que é de 1575,42 MHz, utilizando as equações apresentadas em 3.2.1. Foram feitas simulações para obter os valores de alguns dos parâmetros destas antenas utilizando o software FEKO na versão de estudante, que está disponível em: <https://altairuniversity.com/feko-student-edition/>.

4.1.1 Antena Com *Patch* Retangular

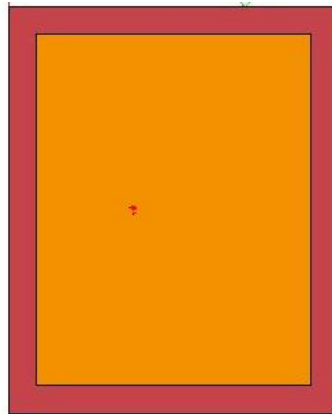
A largura e o comprimento do *patch* retangular calculados a partir das equações (8) e (12), respectivamente, foram $w = 57,4$ mm e $L = 44,6$ mm, com plano de terra com largura igual a 66,4 mm e comprimento igual a 53,6 mm. A vista isométrica da antena com *patch* retangular desenhada no software Feko é mostrada na Figura 15. A Figura 16 mostra a vista superior da mesma antena, onde o ponto em vermelho é a posição do cabo coaxial.

Figura 15 – Antena com *patch* retangular feita no software FEKO (vista isométrica).



Fonte: A autora (2019).

Figura 16 – Antena com *patch* retangular feita no software FEKO (vista superior).

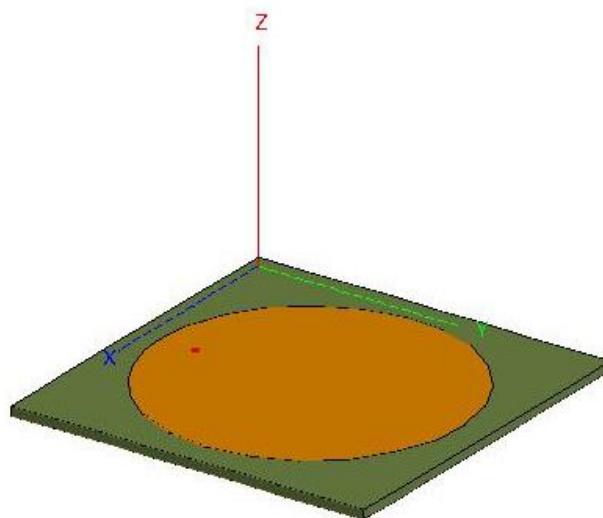


Fonte: A autora (2019).

4.1.2 Antena Com *Patch* Circular

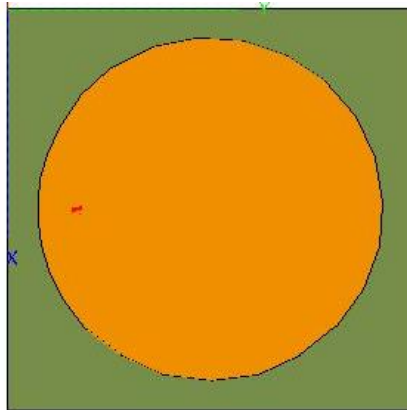
O raio do *patch* circular calculado a partir da equação (14) foi de 26,0 mm, com plano de terra com comprimento e largura iguais a 61,0 mm. A vista isométrica da antena com *patch* circular desenhada no software FEKO é mostrada na Figura 17. A Figura 18 mostra a vista superior da mesma antena, onde o ponto em vermelho é a posição do cabo coaxial.

Figura 17 – Antena com *patch* circular feita no software FEKO (vista isométrica).



Fonte: A autora (2019).

Figura 18 – Antena com *patch* circular feita no software FEKO (vista superior).



Fonte: A autora (2019).

4.2 CONSTRUÇÃO DAS ANTENAS

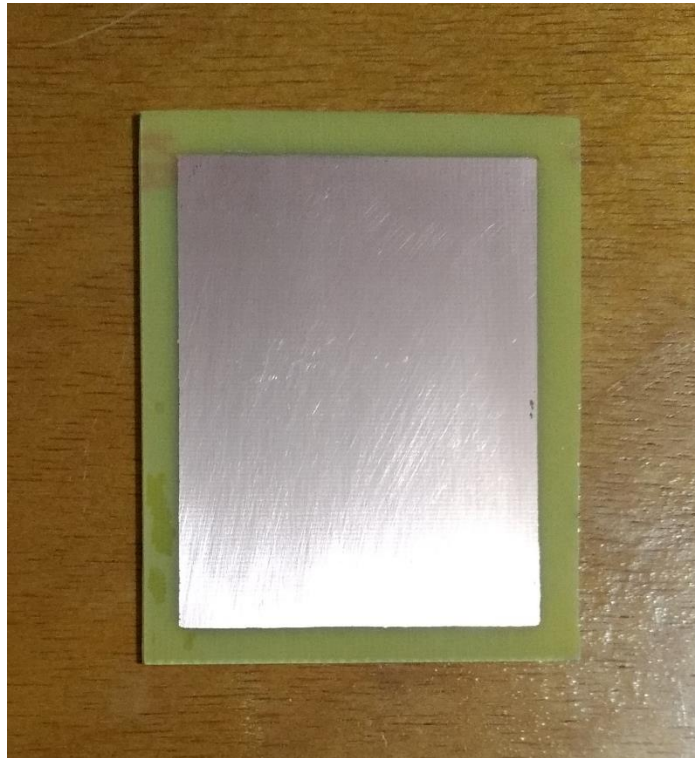
4.2.1 Materiais

As antenas impressas foram feitas utilizando placas de fibra de vidro dupla face, com espessura de 1,5 mm. Foi utilizado um cabo coaxial de 50 Ω para a alimentação das mesmas.

4.2.2 Antena Com *Patch* Retangular

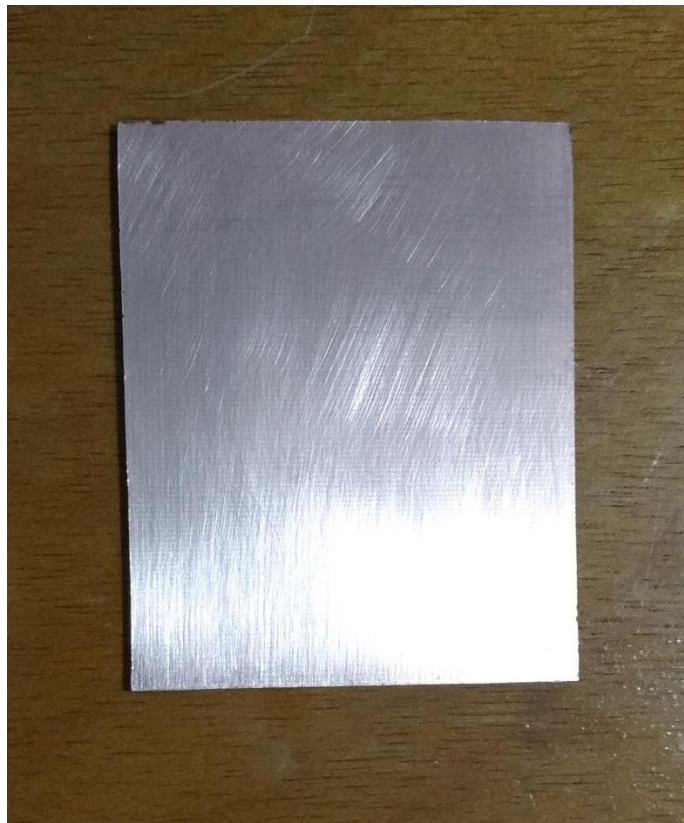
A placa dupla face foi cortada nas dimensões da antena utilizando uma serra manual. Foi desenhado o *patch* retangular, mostrado na Figura 19, e o mesmo foi preenchido utilizando um marcador permanente para que o metal presente nesta área não fosse corroído. A outra face, que é o plano de terra mostrado na Figura 20, também foi coberta com marcador permanente. Em seguida, colocou-se a placa em uma solução de percloroeto de ferro ($FeCl_3$) para realizar a corrosão. Após esta etapa, foi feita a marcação da posição do cabo coaxial. Foi feito um furo nesta posição e o cabo coaxial foi soldado. O condutor interno do cabo coaxial foi soldado no *patch* retangular, enquanto que o condutor externo foi soldado no plano de terra. A Figura 21 mostra a antena com *patch* retangular com o cabo coaxial.

Figura 19 – *Patch* retangular.



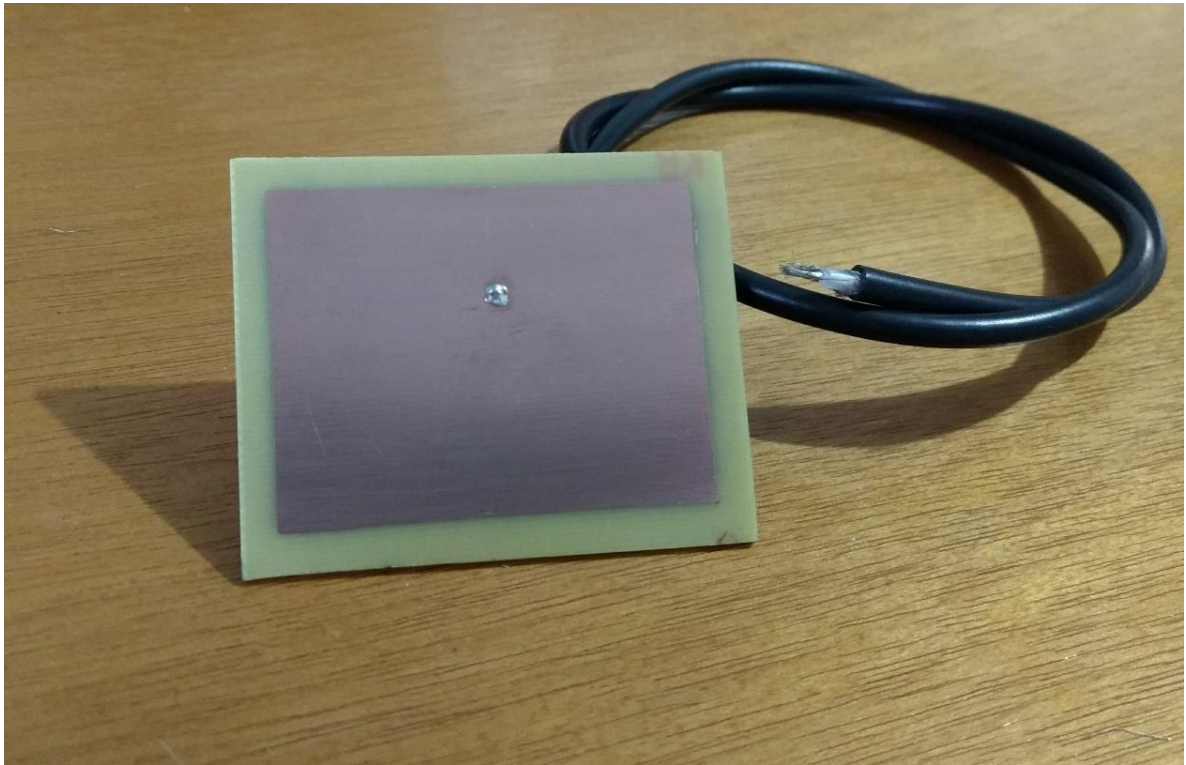
Fonte: A autora (2019).

Figura 20 – Plano de terra da antena com *patch* retangular.



Fonte: A autora (2019).

Figura 21 – Antena com *patch* retangular com cabo coaxial.

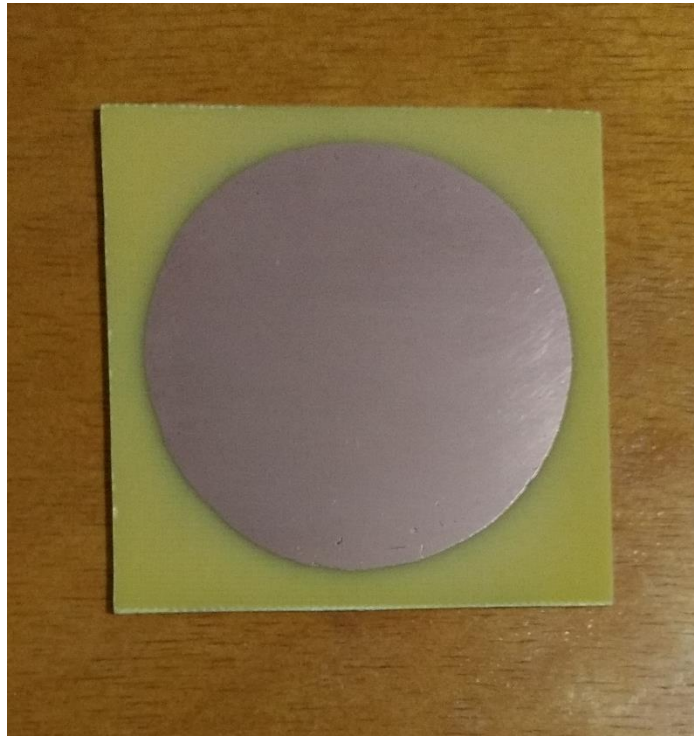


Fonte: A autora (2019).

4.2.3 Antena Com *Patch* Circular

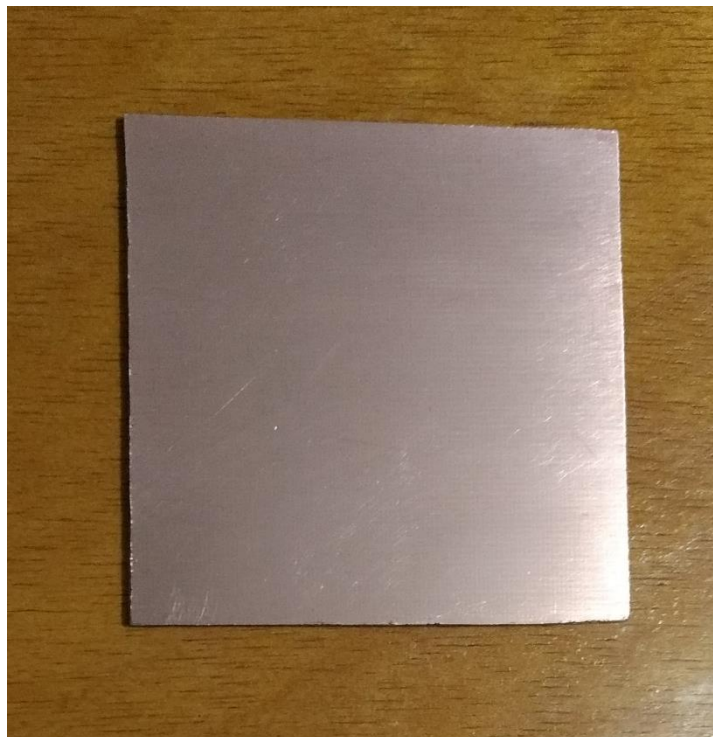
Para a construção da antena com *patch* circular, a placa dupla face foi cortada nas dimensões da antena utilizando uma serra manual. O *patch* circular, mostrado na Figura 22, foi desenhado e preenchido utilizando um marcador permanente para que não houvesse corrosão do metal nesta área. O mesmo procedimento foi feito com o plano de terra, que é mostrado na Figura 23. Em seguida, a placa foi imersa em uma solução de perclorato de ferro, para realizar a corrosão do metal nas áreas que não estavam cobertas com marcador permanente. Após esta etapa, a posição do cabo coaxial foi marcada e foi feito um furo. O condutor interno do cabo coaxial foi soldado no *patch* circular, enquanto que o condutor externo foi soldado no plano de terra. A Figura 24 mostra a antena com *patch* circular com o cabo coaxial.

Figura 22 – *Patch* circular.



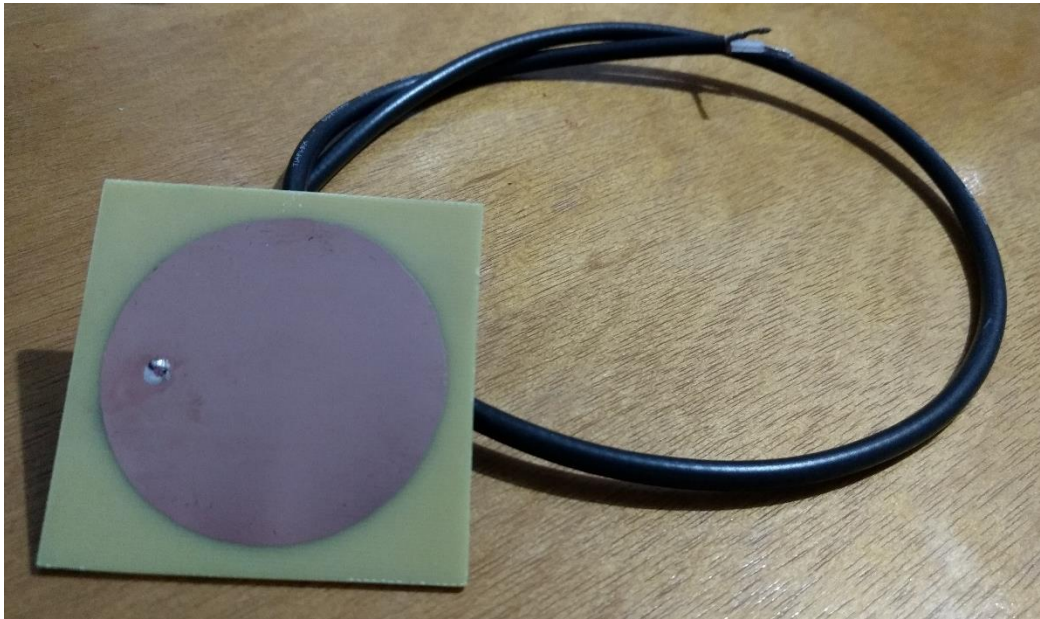
Fonte: A autora (2019).

Figura 23 – Plano de terra da antena com *patch* circular.



Fonte: A autora (2019).

Figura 24 – Antena com *patch* circular e cabo coaxial.



Fonte: A autora (2019).

4.3 TESTES

Foram feitos testes com as antenas utilizando um módulo GPS do tipo GY-GPS6MV1 e um Arduino, que é uma plataforma eletrônica de código aberto. O modelo do Arduino utilizado para os testes com as antenas foi o Arduino UNO, mostrado na Figura 25. O software utilizado é o Arduino IDE, que está disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.

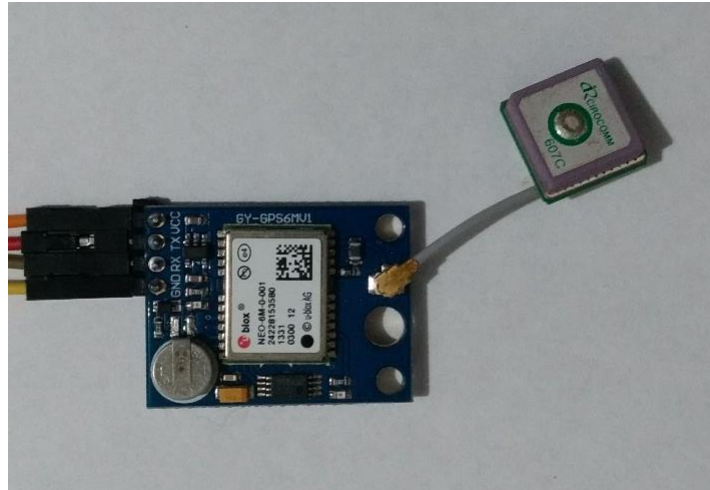
Figura 25 – Arduino UNO



Fonte: A autora (2019).

A Figura 26 mostra o módulo GPS GY-GPS6MV1 com uma antena comercial.

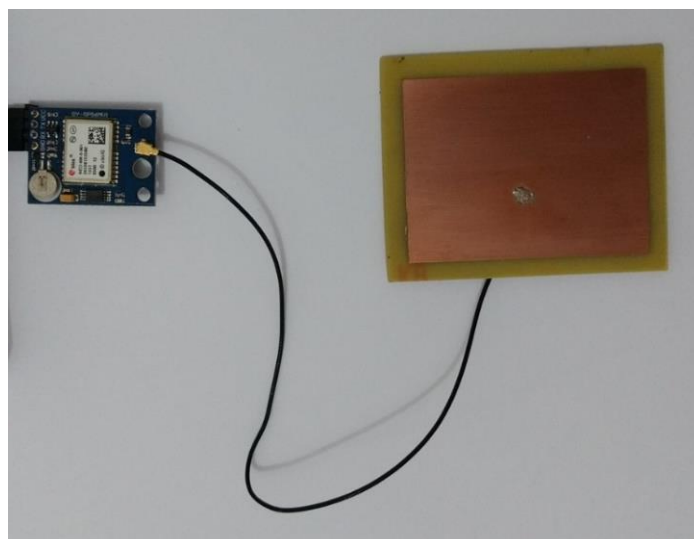
Figura 26 – Módulo GPS GY-GPS6MV1 com uma antena comercial.



Fonte: A autora (2019).

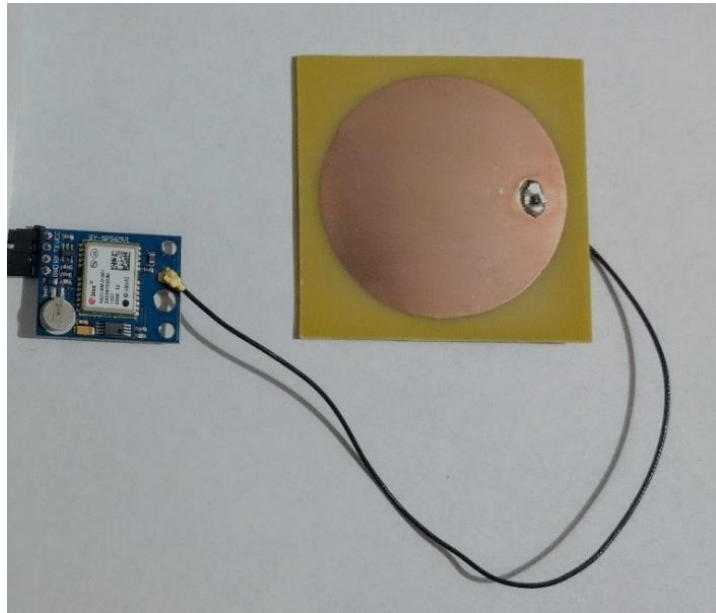
Foram obtidos dados de latitude, longitude, velocidade e número de satélites cujo sinal está sendo recebido. Inicialmente, todas estas informações foram obtidas com a antena comercial. Em seguida, o mesmo procedimento foi feito com as duas antenas desenvolvidas neste trabalho, que foram soldadas a cabos com conectores do tipo U.FL, de modo que pudessem ser conectadas diretamente ao módulo GPS. As Figuras 27 e 28 mostram o módulo GPS conectado às antenas com *patch* retangular e circular, respectivamente.

Figura 27 – Módulo GPS GY-GPS6MV1 com a antena com *patch* retangular.



Fonte: A autora (2019).

Figura 28 – Módulo GPS GY-GPS6MV1 com a antena com *patch* circular.



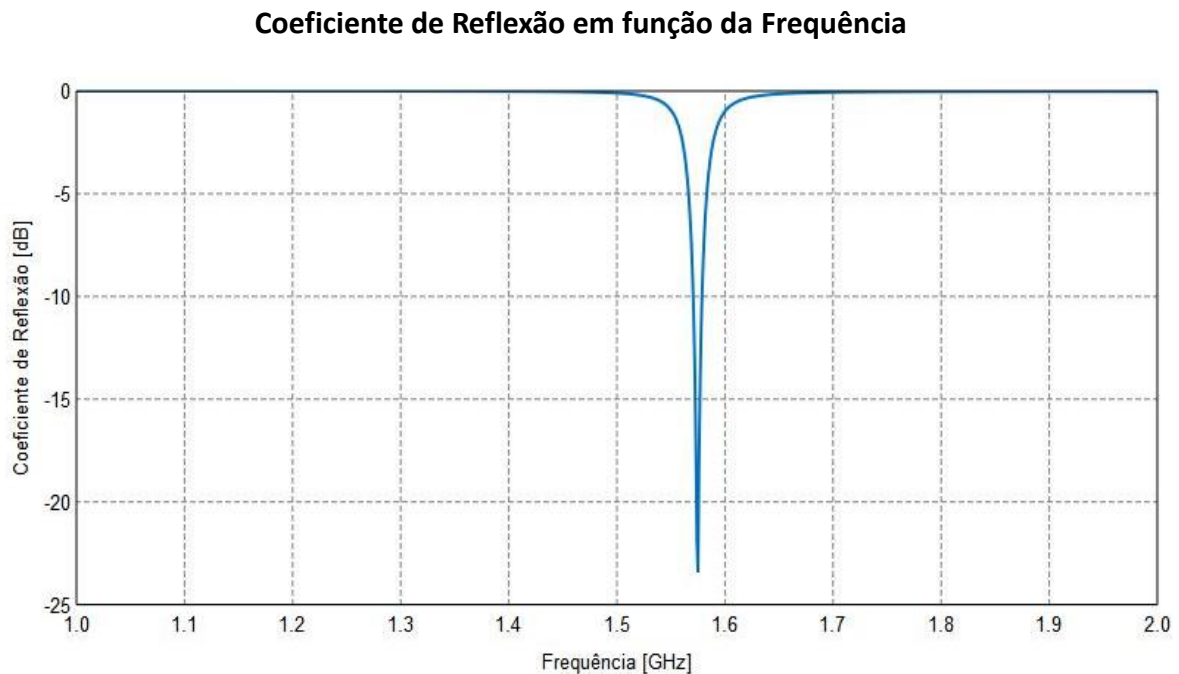
Fonte: A autora (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA ANTENA COM *PATCH* RETANGULAR

Os resultados obtidos a partir da simulação da antena com *patch* retangular são apresentados a seguir. A Figura 29 mostra o gráfico do coeficiente de reflexão, em dB, em função da frequência.

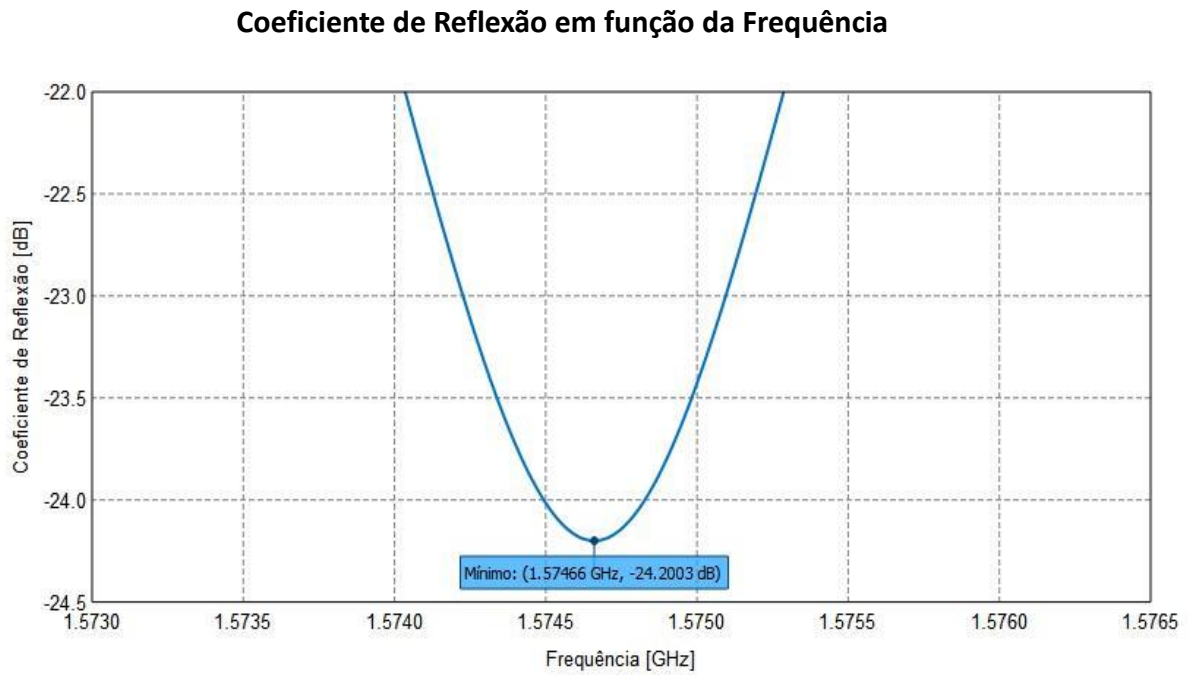
Figura 29 – Simulação do coeficiente de reflexão em função da frequência para a antena retangular.



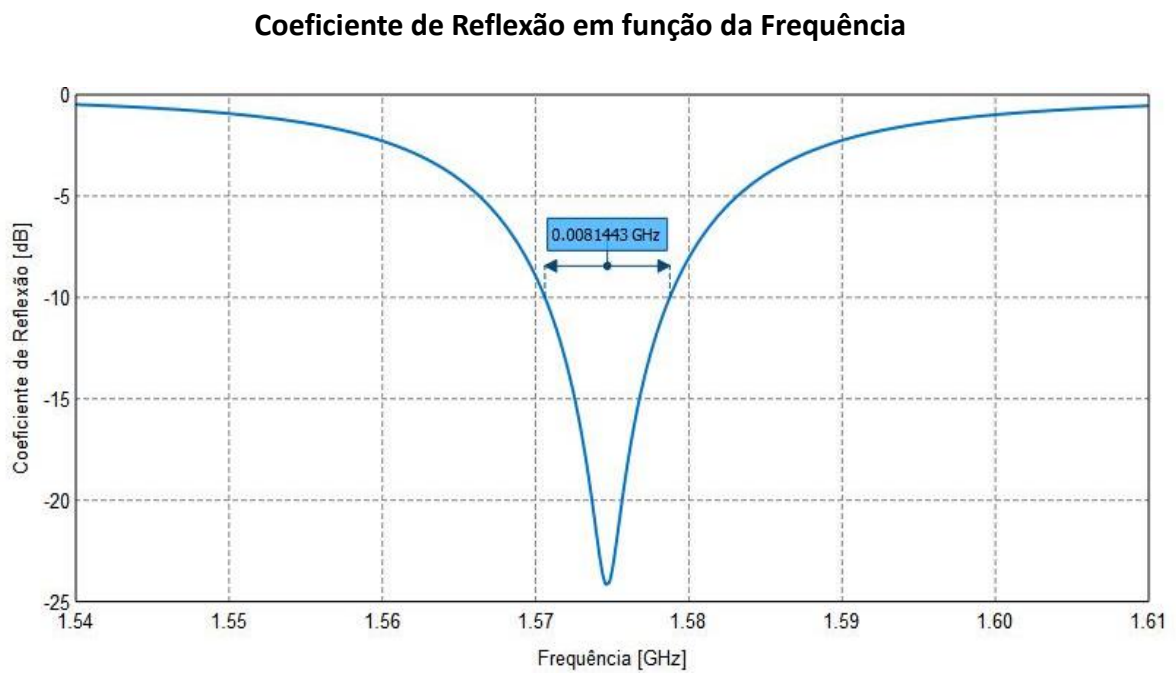
Fonte: A autora (2019).

Utilizando uma função do software que fornece as coordenadas do mínimo do gráfico da Figura 29, como mostrado na Figura 30, verifica-se que a frequência de ressonância da antena com *patch* retangular é igual a 1574,66 MHz, que é um valor muito próximo da frequência L1 dos sinais dos satélites GPS, que é de 1575,42 MHz.

A largura de banda de uma antena é simplesmente a diferença entre os valores das frequências para as quais o coeficiente de reflexão é igual a -10 dB, ou seja, apenas 10% da potência entregue à antena é refletida. A largura de banda obtida a partir da simulação foi de 8,14 MHz, como mostra a Figura 31.

Figura 30 – Frequência de ressonância da antena retangular.

Fonte: A autora (2019).

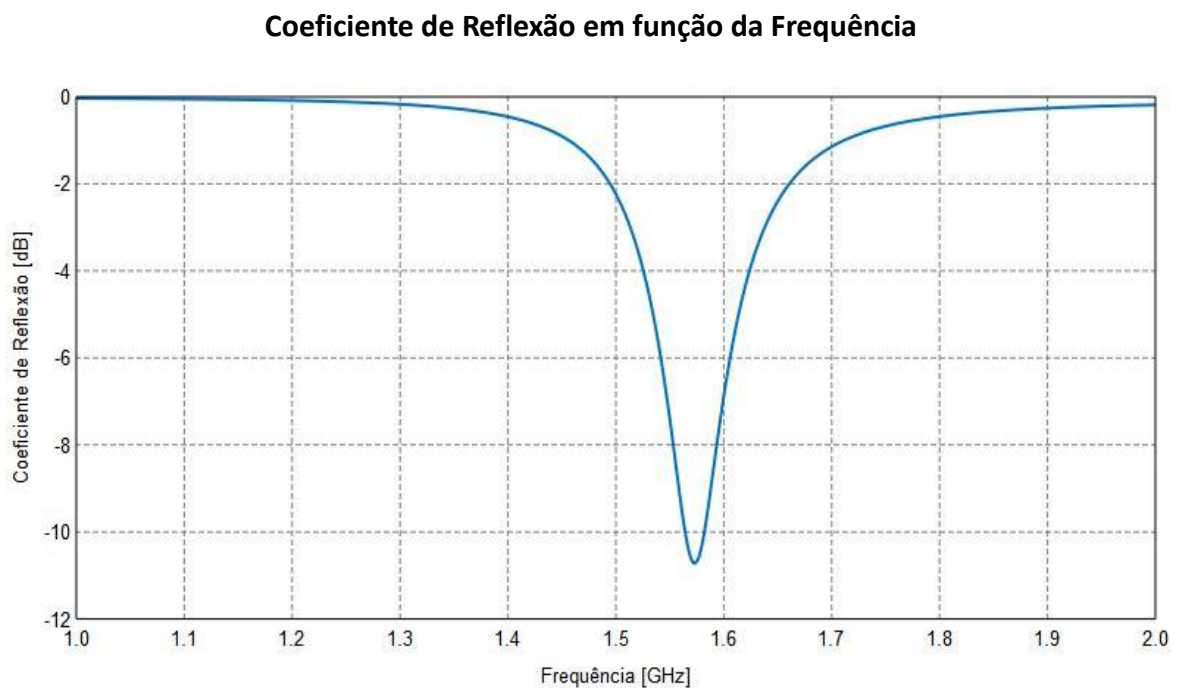
Figura 31 – Largura de banda da antena retangular.

Fonte: A autora (2019).

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA ANTENA COM *PATCH* CIRCULAR

A Figura 32 mostra o coeficiente de reflexão da antena com *patch* circular em função da frequência.

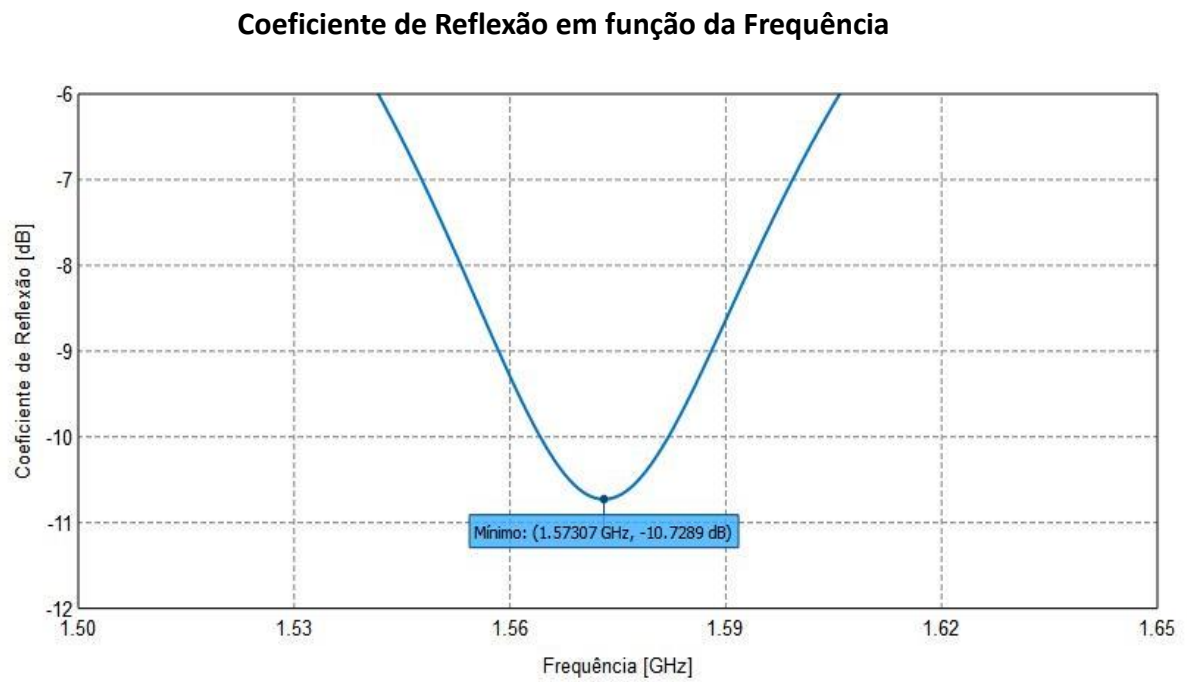
Figura 32 – Simulação do coeficiente de reflexão em função da frequência para a antena circular.



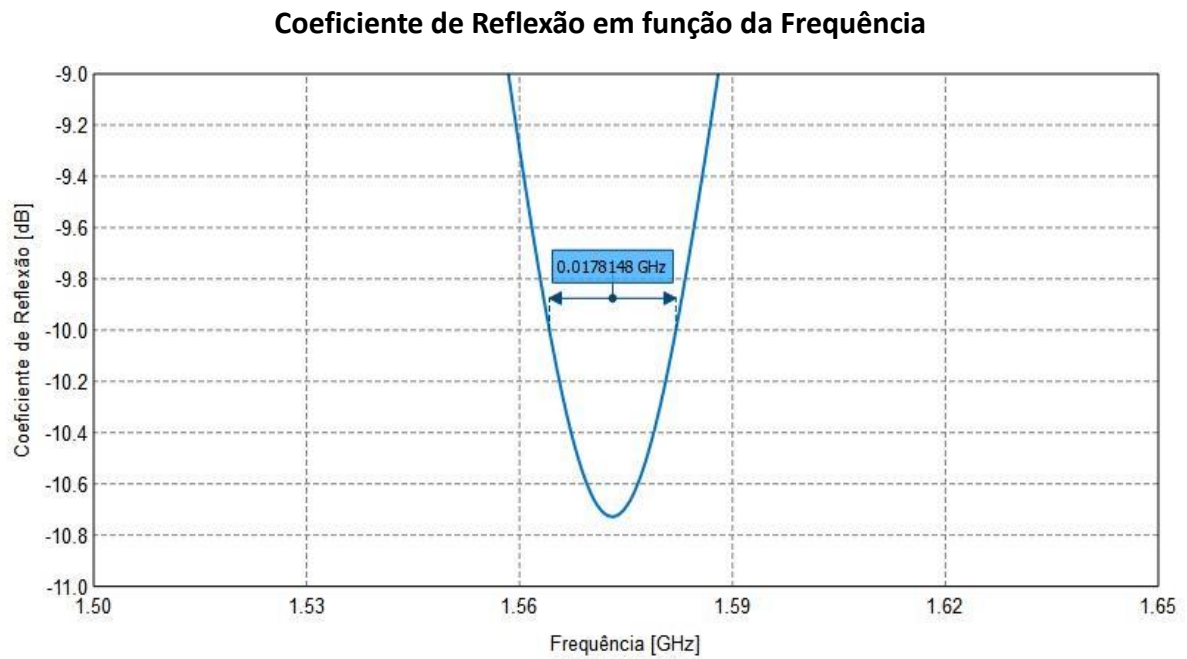
Fonte: A autora (2019).

Foi utilizada uma função do software que fornece as coordenadas do mínimo do gráfico para obter o valor da frequência de ressonância da antena com *patch* circular, como mostra a Figura 33. O valor desta frequência é 1573,07 MHz e está próximo do valor da frequência L1 dos sinais dos satélites GPS, que é de 1575,42 MHz.

O valor da largura de banda da antena foi fornecido pelo software a partir deste mesmo gráfico do coeficiente de reflexão, e é dado pela diferença entre os valores das frequências para as quais o valor do coeficiente de reflexão é igual a -10 dB. A Figura 34 mostra a largura de banda obtida a partir da simulação, que foi de 17,81 MHz.

Figura 33 – Frequência de ressonância da antena com *patch* circular.

Fonte: A autora (2019).

Figura 34 – Largura de banda da antena com *patch* circular.

Fonte: A autora (2019).

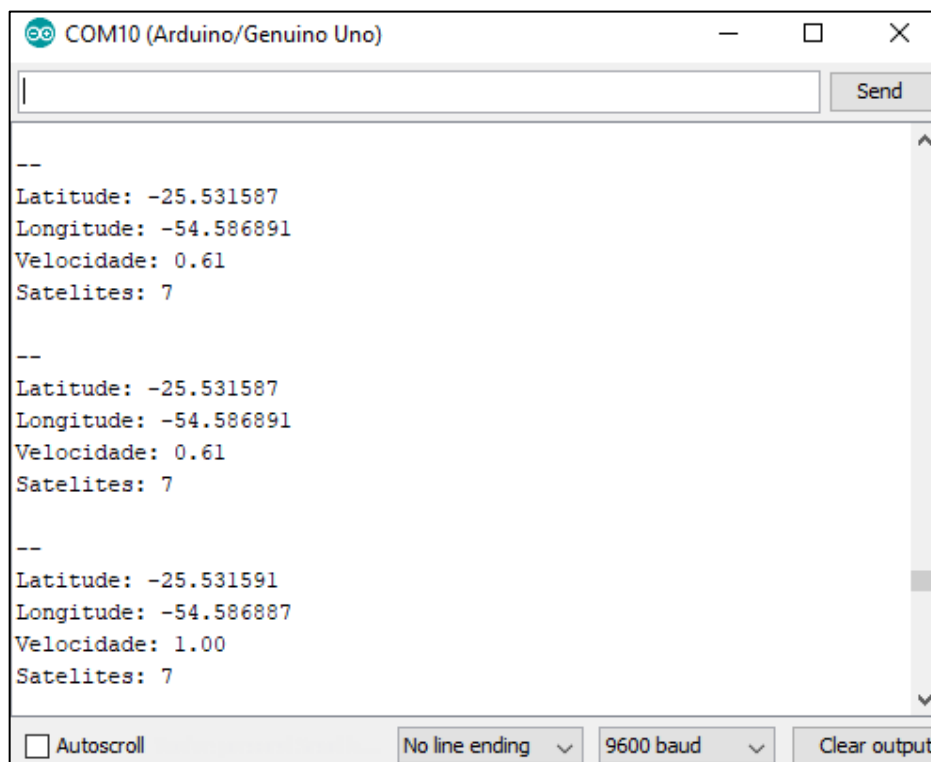
5.3 RESULTADOS DOS TESTES

As Figuras 35, 36 e 37 mostram o monitor serial do software do Arduino com algumas das informações que foram obtidas quando o módulo GPS estava conectado às antenas comercial, com *patch* retangular e com *patch* circular, respectivamente.

Em relação à latitude e à longitude, os valores obtidos com as três antenas apresentam pouca diferença entre si. Em relação à velocidade, os valores medidos com as três antenas apresentaram erros. Estes valores foram maiores do que o esperado, que é de 0,00 m/s, dado que o módulo e a antena estavam imóveis durante os testes.

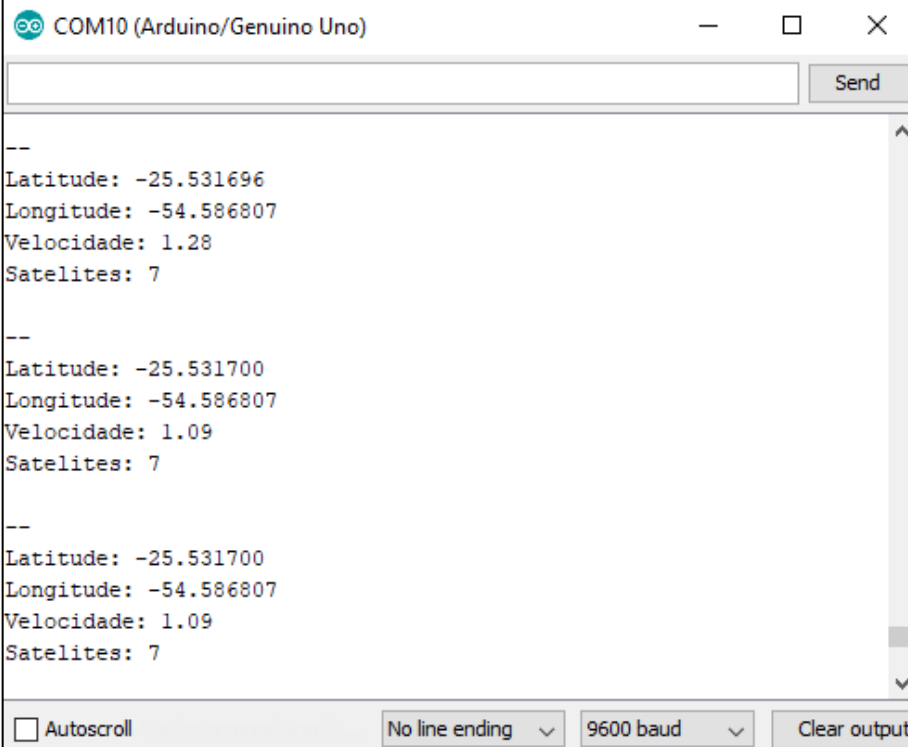
O número máximo de satélites cujos sinais foram recebidos pela antena comercial foi 7. Para a antena com *patch* retangular, o número máximo de satélites também foi 7. Já a antena com *patch* circular foi a que recebeu sinais de um maior número de satélites, possibilitando a recepção de sinais de até 10 satélites ao mesmo tempo.

Figura 35 – Medidas de latitude, longitude, velocidade e número de satélites obtidas com a antena comercial.



Fonte: A autora (2019).

Figura 36 – Medidas de latitude, longitude, velocidade e número de satélites obtidas com a antena com *patch* retangular.



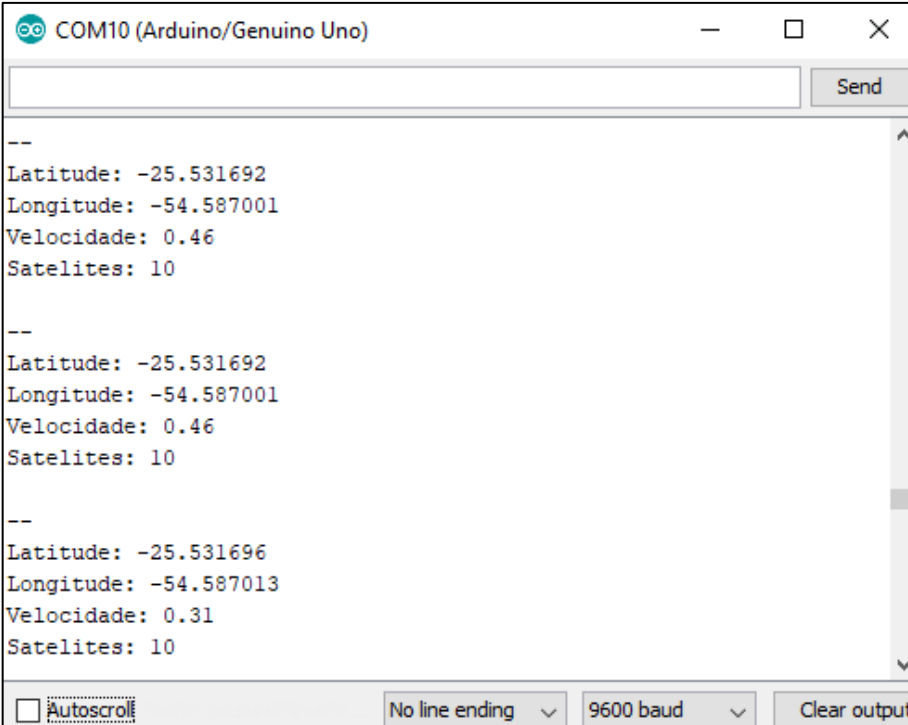
The screenshot shows a serial monitor window titled "COM10 (Arduino/Genuino Uno)". The window contains three lines of data, each preceded by "--". The data for each line is as follows:

Line	Latitude	Longitude	Velocity	Satellites
1	-25.531696	-54.586807	1.28	7
2	-25.531700	-54.586807	1.09	7
3	-25.531700	-54.586807	1.09	7

At the bottom of the window, there are controls: an "Autoscroll" checkbox (unchecked), a "No line ending" dropdown menu, a "9600 baud" dropdown menu, and a "Clear output" button.

Fonte: A autora (2019).

Figura 37 – Medidas de latitude, longitude, velocidade e número de satélites obtidas com a antena com *patch* circular.



The screenshot shows a serial monitor window titled "COM10 (Arduino/Genuino Uno)". The window contains three lines of data, each preceded by "--". The data for each line is as follows:

Line	Latitude	Longitude	Velocity	Satellites
1	-25.531692	-54.587001	0.46	10
2	-25.531692	-54.587001	0.46	10
3	-25.531696	-54.587013	0.31	10

At the bottom of the window, there are controls: an "Autoscroll" checkbox (unchecked), a "No line ending" dropdown menu, a "9600 baud" dropdown menu, and a "Clear output" button.

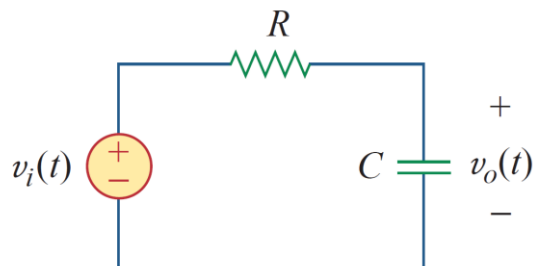
Fonte: A autora (2019).

5.4 DISCUSSÃO

A partir das simulações, verificou-se que tanto a antena com *patch* retangular quanto a antena com *patch* circular apresentaram uma frequência de ressonância próxima a 1575,42 MHz, que é o valor da frequência L1 dos sinais dos satélites GPS. A antena com *patch* circular foi a que apresentou maior largura de banda, cujo valor simulado foi de 17,81 MHz. Deste modo, esta antena opera com valores aceitáveis de seus parâmetros em uma gama de frequências maior do que a antena com *patch* retangular. Além disso, os testes realizados com o módulo GPS mostraram que tanto a antena com *patch* retangular quanto a com *patch* circular podem ser utilizadas para receber sinais de satélites GPS.

Houve uma tentativa de medir a impedância das antenas de forma indireta com um filtro passa-baixo. Este tipo de filtro permite a passagem de sinais de baixa frequência e reduz a intensidade de sinais de alta frequência. Um filtro passa-baixo típico é formado quando a saída de um circuito RC é tomada no capacitor, como mostra Figura 38 (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Figura 38 – Filtro passa-baixo.



Fonte: ALEXANDER; SADIKU (2013).

Uma função de transferência é a relação entre a saída e a entrada de um sistema e, neste caso, é dada por:

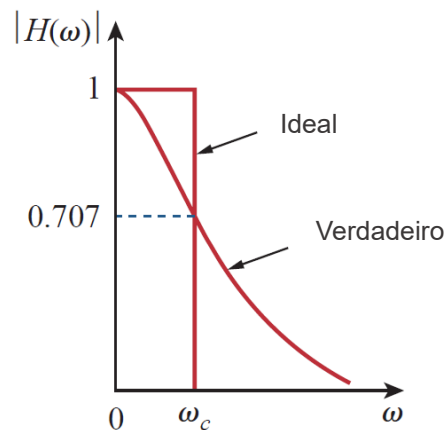
$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C}, \quad (16)$$

onde ω é a frequência do sinal, R é o valor da resistência e C é o valor da capacitância (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Simplificando, obtém-se a equação:

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (17)$$

A Figura 39 mostra o gráfico de $|H(\omega)|$, onde é apresentado o comportamento ideal do filtro e o comportamento verdadeiro (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Figura 39 – Gráfico do módulo da função de transferência $H(\omega)$.



Fonte: Adaptado de ALEXANDER; SADIKU (2013).

A frequência de corte, ω_c , é obtida quando o módulo de $H(\omega)$ é igual a $1/\sqrt{2}$, como mostra a equação (ALEXANDER; SADIKU, 2013):

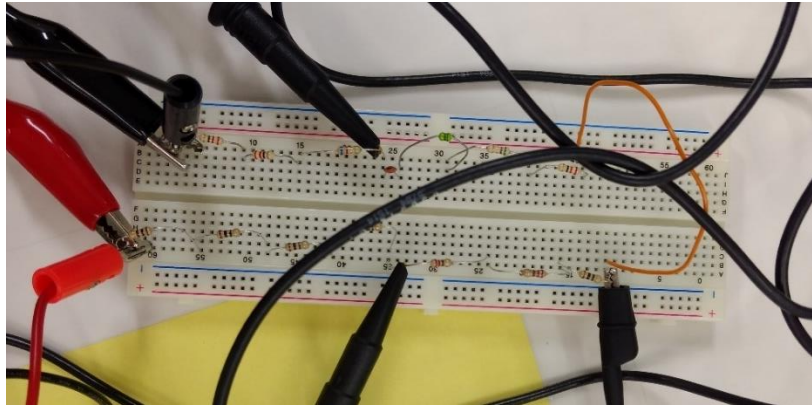
$$|H(\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_c^2 R^2 C^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

Portanto, a frequência de corte é dada por:

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (19)$$

Existem muitos outros circuitos que podem ser utilizados como filtros passa-baixo (ALEXANDER; SADIKU, 2013). Para a montagem do circuito do filtro passa-baixo usado no experimento, foram utilizados resistores, capacitores e indutores. Este circuito é mostrado na Figura 40.

Figura 40 – Circuito do filtro passa-baixo utilizado no experimento com as antenas.



Fonte: A autora (2019).

As antenas foram ligadas ao circuito e um sinal senoidal foi aplicado com um gerador de funções. Com um osciloscópio, foram obtidas medidas de tensão em função do tempo. Entretanto, não foram obtidos resultados que permitissem o cálculo de impedância das antenas pois os equipamentos utilizados não operam com frequências altas o suficiente.

Além disso, não havia equipamentos que permitissem a obtenção do gráfico do coeficiente de reflexão em função da frequência no laboratório. Sendo assim, não foi possível fazer uma comparação entre valores medidos em laboratório e os valores que foram simulados neste trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi feito um estudo sobre o GPS e as antenas de microfita. Durante o estudo do GPS, foram apresentadas suas características e foi discutido sobre as correções relativísticas que devem ser realizadas nos relógios atômicos dos satélites GPS. Em relação às antenas de microfita, foram estudadas suas características e, posteriormente, foram calculadas as dimensões de duas antenas com geometrias diferentes para receber sinais de satélites GPS. Foram feitas simulações com estas antenas, onde os resultados mostraram que a frequência de ressonância das mesmas é bem próxima do valor da frequência L1 do GPS. Foram feitos testes com as antenas utilizando um módulo GPS, e verificou-se que a antena com *patch* circular foi a que recebeu sinais de um maior número de satélites ao mesmo tempo. A maior dificuldade encontrada durante o desenvolvimento deste trabalho foi a falta de equipamentos no laboratório que permitissem a realização de experimentos com as antenas para obter os valores de alguns parâmetros, impossibilitando uma comparação com os resultados das simulações. Uma perspectiva para trabalhos futuros é realizar as medidas nas antenas com um equipamento adequado, tornando possível uma comparação dos resultados obtidos com os resultados da simulação.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentals of Electric Circuits**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.
- ALFREDO, D. J.; FIGUEIREDO, G. F. **Antenas de microlinha para UHF**. Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, 2012.
- ANTENNA THEORY. **S-Parameters**. 2015. Disponível em: <http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>. Acesso em: 25 out. 2019.
- BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- BRAGA, N. C. **Como fazer uma placa de circuito impresso**. 2011. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/index.php/projetos-educacionais/3612-art494>. Acesso em: 25 out. 2019.
- CAMPISTA, M. E. M. **Antenas**. 2003. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/seminarios/semin2003_1/miguel/Capitulo4.htm. Acesso em: 19 out. 2019.
- CARARO, A. C. **Correções relativísticas sobre as medidas de tempo GPS**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- EMBRAPA TERRITORIAL. **Satélites de Monitoramento**. Campinas, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento>. Acesso em: 28 out. 2019.
- FIORAVANTI JUNIOR, E. **Apostila de GPS**. InfoAgro Comércio, Administração e Gerenciamento Agropecuário LTDA-ME, 2010.
- GERALDO, F. C. **Antenas de Microlinha Multibanda**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações), Universidade Estadual Paulista, São João da Boa Vista, 2018.
- GPS.GOV. **Space Segment**. 2019. Disponível em: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>. Acesso em: 25 set. 2019.
- HALLAS, J. R. **Basic Antennas Understanding: Practical Antennas and Design**. The National Association for Amateur Radio, 2009.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna**. v. 4. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- HYPERWORKS. **Examples Guide for FEKO 14.0**. 2015.
- JAIN, A. Rectangular Microstrip Patch Antenna for Global Position System. **International Journal of Engineering Trends and Technology**. v. 37. n. 1. 2016.

MIGUENS, A. P. **Navegação: A Ciência e a Arte**. v. 3. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2000.

MILLIGAN, T. A. **Modern Antenna Design**, 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

MOURA, A. A. **Antenas e Propagação**. 2015. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~amoura/APROWEB/AAM_Param_Fundamentais.pdf. Acesso em: 25 out. 2019.

NATÁRIO, J. **O GPS e a Teoria da Relatividade**. 2015. Disponível em: https://sprg.tecnico.ulisboa.pt/media/cms_page_media/21/GPS.pdf. Acesso em: 25 out. 2019.

SANTOS, H. W. **Desenvolvimento de antenas de microfita miniaturizadas com polarização circular para sistemas de comunicação sem fio**. 2016. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SILVEIRA, R. V. L. Um estudo teórico sobre o uso das antenas de microfita. In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO, 3., 2016, Natal. **Anais...** Natal, 2016.

TELECO. **Redes Wi-Fi I: Antenas**. 2019. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorial-redeswifi1/pagina_3.asp. Acesso em: 25 out. 2019.

VIDA DE SILÍCIO. **Módulo GPS NEO-6M com Arduino**. 2018. Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/modulo-gps-neo-6m/>. Acesso em: 25 out. 2019.