



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DA PARAÍBA - IFPB

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RILBERT LIMA DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE UMA ANTENA HELICOIDAL COMERCIAL

João Pessoa

2023

RILBERT LIMA DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE UMA ANTENA HELICOIDAL COMERCIAL

Trabalho de conclusão de curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva

João Pessoa

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

S586e Silva, Rilbert Lima da.

Caracterização de uma antena helicoidal comercial / Rilbert Lima da Silva. - 2023.

39 f. : il.

TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2023.

Orientação : Prof^o D.r Jefferson Costa e Silva.

1. Antenas. 2. Antena Helicoidal. 3. Coeficiente de reflexão.
4. Caracterização numérica. 5. Medições. I. Título.

CDU 621.396.67(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária - CRB 15/132

RILBERT LIMA DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE UMA ANTENA HELICOIDAL COMERCIAL

Trabalho de conclusão de curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Relatório aprovado pela banca examinadora em João Pessoa, 16 de Junho de 2023

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 JEFFERSON COSTA E SILVA
Data: 29/06/2023 12:37:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva
Orientador - IFPB

Documento assinado digitalmente
 ALFREDO GOMES NETO
Data: 29/06/2023 16:09:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto
Convidado - IFPB

Documento assinado digitalmente
 MICHEL COURA DIAS
Data: 30/06/2023 13:06:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Michel Coura Dias
Convidado - IFPB

João Pessoa - PB, Junho de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a minha família, que sempre me apoiaram ao longo da minha vida.

Agradeço ao meu professor e orientador Jefferson Costa e Silva, pelo seu apoio durante esse período em que estive em sua tutoria, que foi de extrema importância para o percurso de grande parte dessa jornada.

Sou grato a todos professores que participaram dessa ao longo de minha formação, proporcionando uma melhor convivência e bastante aprendizado.

Agradeço a todos os colegas com qual participei desta longa jornada, especialmente a Álef Huan, Almir Santos, Anderton Mateus, Bryan Lucas, Henrique Pontes, Matheus Lima, Mateus Lucas e Marcello de Araújo.

RESUMO

Esse trabalho de conclusão de curso tem como objetivo expor o processo de caracterização de duas antenas helicoidais comercial idênticas e analisar os resultados em relação aos dados fornecidos pelo fabricante. Para essa caracterização, faz-se necessário dividir em dois segmentos, a experimental e a numérica. A caracterização experimental utilizou-se do equipamento Keysight ENA E5071C Network Analyzer para análise da curva do coeficiente de reflexão de ambas as antenas helicoidais. Para a caracterização numérica, foram realizadas medições das dimensões físicas da antena helicoidal e exportando os dados medidos obtidos para a construção da antena utilizando os programas de computador 4NEC2 e ANSYS HFSS. Após comparação entre as duas caracterizações realizadas, foram necessários ajustes para adequar os resultados numéricos e experimental e compará-los com os dados fornecido ao fabricante.

Palavras-chaves: Antena helicoidal; Coeficiente de reflexão; Caracterização numérica; Medições.

ABSTRACT

This paper aims to show the characterization process of two identical commercial helical antennas and analyzing the results in relation to the data provided by the manufacturer. For this characterization, it is necessary to divide it into two segments, the experimental and the numerical. The experimental characterization used the Keysight ENA E5071C Network Analyzer equipment to analyze the reflection coefficient curve of both helical antennas. For the numerical characterization, physical measurements of the helical antenna were carried out and exporting the average data obtained for the construction of the antenna using the 4NEC2 and ANSYS HFSS *softwares*. After comparing the two characterizations performed, adjustments were necessary to adapt the numerical and experimental results and compare them to the data provided by the manufacturer.

Keywords: Helical antenna; Reflection coefficient; Numerical characterization; Measurements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Tipos de antenas.	13
Figura 2.2 – Diagrama de irradiação de uma antena log-periódica.	15
Figura 2.3 – Polarização linear, circular e elíptica da onda eletromagnética.	17
Figura 2.4 – Gráfico de S11 de uma antena.	18
Figura 2.5 – Antena helicoidal comercial com um plano de terra em formato de concha.	18
Figura 2.6 – Antena helicoidal com plano terra.	19
Figura 2.7 – Características e equivalência da antena helicoidal em modo normal.	21
Figura 2.8 – Diagrama de irradiação da antena helicoidal em modo Axial.	21
Figura 3.1 – Janelas do <i>software</i> 4NEC2.	22
Figura 3.2 – Janelas do <i>software</i> ANSYS HFSS.	23
Figura 4.1 – Antena helicoidal de cobre.	24
Figura 4.2 – Keysight ENA E5071C Network Analyzer.	25
Figura 4.3 – Abrir janela de edição de estruturas no 4NEC2.	26
Figura 4.4 – Configuração da antena helicoidal no 4NEC2.	27
Figura 4.5 – Configuração de dimensões da antena helicoidal no ANSYS HFSS.	28
Figura 4.6 – Alteração das variáveis de dimensão da antena helicoidal no ANSYS HFSS.	28
Figura 4.7 – Configuração de solução no ANSYS HFSS.	29
Figura 5.1 – Gráfico do S11 da primeira antena helicoidal.	30
Figura 5.2 – Gráfico do S11 da segunda antena helicoidal.	30
Figura 5.3 – Gráfico do S11 da antena helicoidal utilizando o <i>software</i> 4NEC2.	31
Figura 5.4 – Diagrama de irradiação 3D da antena helicoidal no 4NEC2.	32
Figura 5.5 – Diagrama de irradiação 2D da antena helicoidal no 4NEC2.	32
Figura 5.6 – Gráfico do S11 da antena helicoidal utilizando o <i>software</i> ANSYS HFSS.	33
Figura 5.7 – Diagrama de irradiação 3D no ANSYS HFSS.	33
Figura 5.8 – Diagrama de irradiação 2D no ANSYS HFSS.	34
Figura 5.9 – Gráficos sobrepostos do S11 da primeira antena helicoidal com os resultados simulados e medidos (Antena Real).	35
Figura 5.10 – Gráficos sobrepostos do S11 da primeira antena helicoidal com os resultados simulados e medidos (Antena Real).	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados da antena helicoidal fornecido pelo fabricante.	24
Tabela 5.1 – Dados de ressonância entre a primeira antena helicoidal medida e os <i>softwares</i> 4NEC2 e Ansys HFSS.	36
Tabela 5.2 – Dados de ressonância entre a segunda antena helicoidal medida e os <i>softwares</i> 4NEC2 e Ansys HFSS.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
HFSS	<i>High-Frequency Structure Simulator</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
λ	Comprimento de Onda
α	Ângulo de passo
π	Número Pi
S_{11}	Coefficiente de Reflexão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo geral	11
1.1.2	Objetivo específicos	12
1.2	Estrutura do trabalho	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Antenas	13
2.1.1	Diagrama de irradiação	14
2.1.2	Diretividade	16
2.1.3	Ganho	16
2.1.4	Polarização	16
2.1.5	Coefficiente de reflexão e largura de banda	17
2.1.6	Antenas helicoidais	18
2.1.6.1	Modo normal	20
2.1.6.2	Modo axial	20
3	<i>SOFTWARES</i> DE SIMULAÇÃO	22
3.1	4NEC2	22
3.2	ANSYS high-Frequency structure simulator	22
4	METODOLOGIA	24
5	RESULTADOS	30
5.1	Caracterização experimental	30
5.2	Caracterização numérica	31
5.2.1	4NEC2	31
5.2.2	ANSYS HFSS	33
5.3	Análise dos dados	34
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Antenas são dispositivos de comunicação que operam, seja emitindo ou detectando ondas eletromagnéticas em um espaço.

As antenas têm sido amplamente utilizadas em diversas aplicações, desde a criação do telégrafo sem fio, por Guglielmo Marconi (NOBEL, 2022).

As inovações tecnológicas estão cada vez mais acessíveis ao público. Portanto, qualquer um desses dispositivos pode ser encontrado com muita facilidade em diversas aplicações do dia a dia, seja em uma antena de estação de rádio, um celular, um carro, uma TV em nossas casas, dentre outros. Com a rápida chegada da internet, isso se tornou ainda mais difundido, pois onde quer que haja acesso à internet, há uma antena em um roteador Wi-Fi e/ou no celular (GODINHO, 2018).

A antena se destaca pela capacidade de permitir a mobilidade durante a transmissão de dados no uso em diversos sistemas de comunicação, tornando mais fácil e prática a vida dos usuários. Com cada circuito de rádio enlace implementado, várias centenas de metros de condutores são economizados e com isso a redução no impacto ambiental é inestimável (UNESP, 2018).

Além disso, cada antena tem a sua configuração, seja a partir da polarização, modo de operação, banda de operação, formato e tamanho. Uma extensa lista de antenas e suas definições podem ser encontrada no documento "Standard for Definitions of Terms for Antennas", criado em 2013 pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (BALANIS, 2016).

Dentre as inúmeras opções de antenas disponíveis, a antena helicoidal (ou antena de hélice) é um dos modelos amplamente utilizados em aplicações de telemetria espacial e transmissões portáteis devido sua compactidade e facilidade de integração com sistemas móveis, além de possuir uma fácil construção, tamanho razoável, baixo custo e permitir a emissão de ondas com polarização circular, que favorece a comunicação com outros tipos de antenas (ROY, 2022).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar experimentalmente e numericamente uma antena helicoidal comercial e determinar suas características de irradiação.

1.1.2 Objetivo específicos

- Caracterizar experimentalmente uma antena helicoidal comercial utilizando o equipamento Keysight ENA E5071C Network Analyzer, verificando o coeficiente de reflexão;
- Caracterizar numericamente uma antena helicoidal comercial utilizando os *softwares* 4NEC2 e ANSYS HFSS, verificando os parâmetros de coeficiente de reflexão e diagramas de irradiação;
- Realizar a comparação dos dados numéricos e experimentais com os fornecidos pelo fabricante da antena.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho em questão divide-se em cinco capítulos no qual esta Introdução é o primeiro deles. Em seguida, há uma explicação teórica sobre antenas e seus diversos parâmetros de análise, dando uma ênfase para as antenas helicoidais, sendo este o capítulo Revisão Bibliográfica. O terceiro capítulo destacará as ferramentas necessárias para a caracterização numérica, sendo esses os programas de computador 4NEC2 e ANSYS HFSS. O quarto capítulo aborda a metodologia aplicada para a verificação da problemática gerada pelos objetivos do trabalho. No quinto capítulo são expostos os resultados e análise dos dados obtidos e, findando o trabalho, com as considerações finais e as referências.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

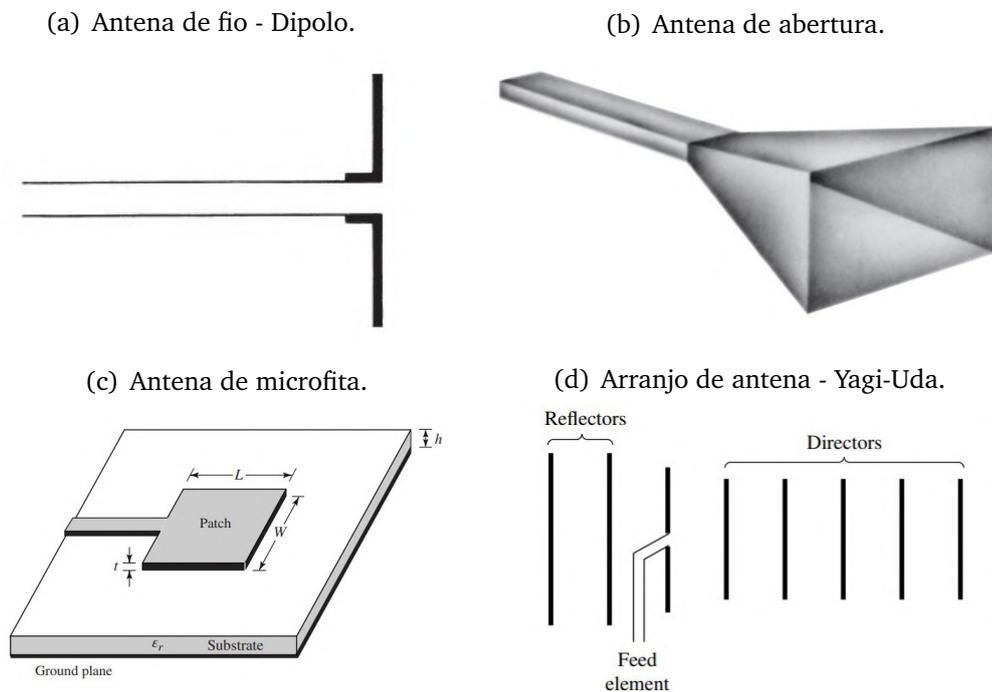
2.1 ANTENAS

A antena pode ser descrita como uma estrutura, geralmente feita de um material condutor, e construída para ter forma e tamanho de modo a irradiar eficientemente a energia eletromagnética, servindo assim como a transição entre uma linha de transmissão e o espaço livre e vice-versa.

Em sistemas que usam transmissão por ondas de rádio, a antena transmissora irradia a potência do sinal em uma região específica do espaço. Desta, apenas uma pequena parte da potência irradiada é captada pela antena receptora. Assim, há uma perda de acoplamento significativa entre as antenas de transmissão e recepção (STUTZMAN, 1997).

O tamanho mínimo da sua estrutura deve ser comparável ao comprimento de onda (λ) de transmissão desejado, para haver irradiação com eficiência, além de existir diferentes geometrias e formatos de acordo com a Figura 2.1:

Figura 2.1 – Tipos de antenas.



Fonte: (BALANIS, 2016).

As antenas de fio são as mais comuns e de simples construção. Essas antenas são construídas a partir de um metal condutor, seja em tubo ou fio em diferentes formas e tamanhos. Um dos exemplos mais simples deste tipo de antenas são as antenas dipolos,

conforme pode-se verificar na Figura 2.1 (a). As antenas helicoidais se enquadram neste tipo de classificação.

A antena de abertura consiste em uma estrutura, no formato de uma abertura, por onde passam os campos eletromagnéticos (STUTZMAN, 1997). Neste tipo de antena pode-se ter uma abertura quadrada, retangular, circular, elíptica ou qualquer outra configuração, conforme pode-se verificar na Figura 2.1 (b).

A antena de microfita consiste em uma tira muito fina de um material metálico colocado a uma fração de um comprimento de onda acima de um plano de terra, conforme pode-se observar na Figura 2.1 (c) (BALANIS, 2016).

O arranjo de antenas é um conjunto de múltiplas antenas, sejam elas de fio, de abertura ou microfita, que são agrupadas, assim funcionando juntas como uma única antena, para transmitir ou receber ondas de rádio, conforme pode-se verificar um arranjo de antenas de fio, do tipo dipolos, na Figura 2.1 (d).

Para descrever o desempenho de uma antena, são necessárias definições de vários parâmetros. Alguns dos parâmetros estão inter-relacionados e nem todos precisam ser especificados para uma descrição do desempenho da antena. Além disso, as antenas possuem diversas particularidades a partir de cada tipo de estrutura que é criada, alguns desses parâmetros são descritos, entre eles o Diagrama de irradiação, Diretividade, Ganho, Polarização, Largura de Banda e Coeficiente de Reflexão.

2.1.1 Diagrama de irradiação

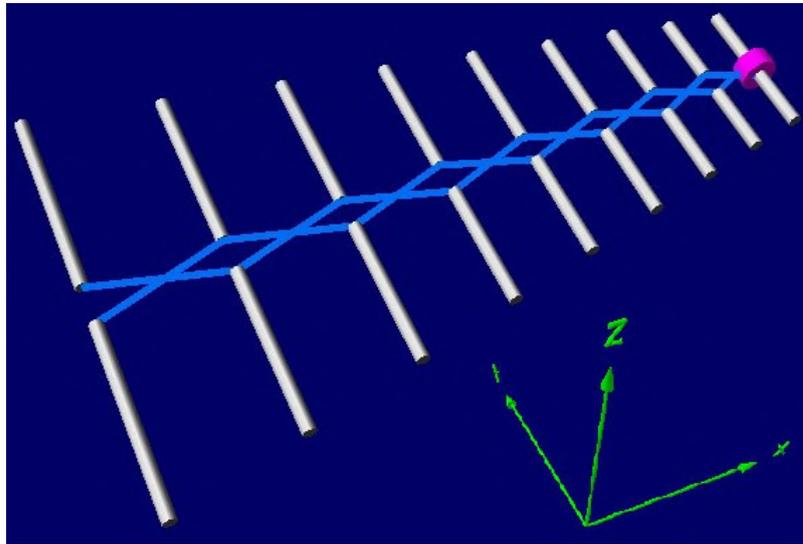
O diagrama de irradiação é a representação gráfica das propriedades de uma antena em função das coordenadas espaciais, conforme pode-se verificar na Figura 2.2. Este parâmetro é definido na região de campo distante, no qual o campo irradiado exibe um comportamento de onda plana localizado e a distribuição do campo angular é independente da distância da antena.

O diagrama de irradiação mostra diversos padrões em diversos ângulos chamados lóbulos. O lóbulo de irradiação é a porção do padrão de irradiação delimitado por regiões de intensidade de irradiação relativamente fraca (BALANIS, 2016).

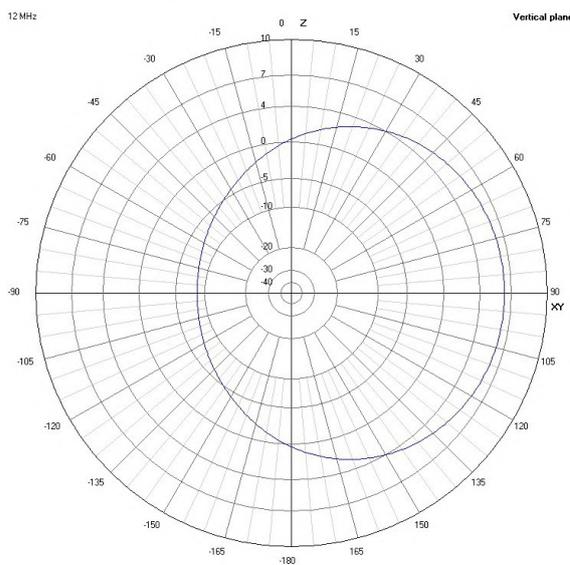
Esses lóbulos são classificados em três tipos, sendo eles o lóbulo principal, lóbulos secundários e lóbulo oposto. O lóbulo principal é aquele que contém a direção da irradiação máxima, ou seja, a maior intensidade de irradiação. Os lóbulos secundários são os lóbulos que apresentam-se adjacentes ao lóbulo principal, tendo uma menor intensidade de irradiação, quando comparado ao lóbulo principal. O lóbulo oposto situa-se em 180° em relação em ao lóbulo principal, sendo assim, o lado oposto do mesmo.

Figura 2.2 – Diagrama de irradiação de uma antena log-periódica.

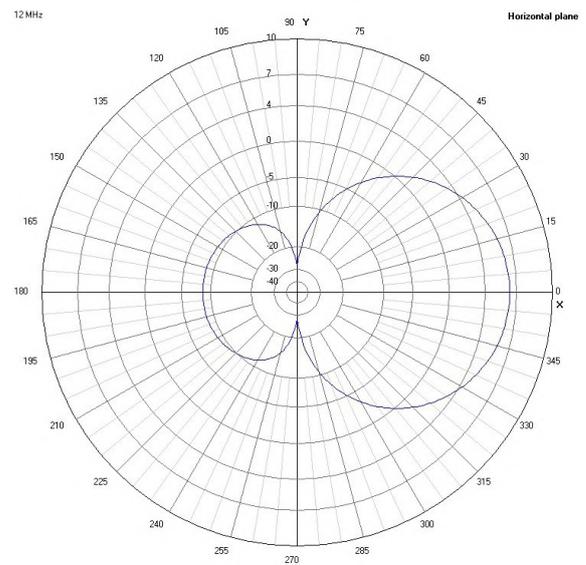
(a) Antena log-periódica.



(b) Diagrama de irradiação vertical.



(c) Diagrama de irradiação horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* 4NEC2.

Os diagramas de irradiação são geralmente classificados como isotrópicos, direcionais ou omnidirecionais. Uma antena ideal que irradia uniformemente em todas as direções é chamada de antena isotrópica. Apesar que esse tipo de antena não exista na prática, utiliza-se a antena isotrópica como referência para medir as características das demais antenas.

Da mesma forma, todas as antenas reais transmitem e recebem, com eficiência, ondas eletromagnéticas em apenas algumas direções, com isso essas antenas são chamadas de antenas direcionais.

Já o padrão omnidirecional é definido como uma antena que possui padrão essencialmente não direcional, em um determinado plano (azimute), e um padrão direcional em qualquer plano ortogonal (elevação) (BALANIS, 2016).

2.1.2 Diretividade

A diretividade de uma antena pode ser definida como a razão entre a intensidade de irradiação de uma antena sem perdas na direção do máximo e a intensidade de irradiação dessa mesma antena, considerando-a isotrópica. Portanto, a diretividade é um dos parâmetros mais importantes de uma antena, no qual indica quanta energia uma antena concentra na direção desejada em comparação com a irradiação nas demais direções.

2.1.3 Ganho

O conceito de ganho assemelha-se ao de Diretividade, porém, no ganho considera-se a perda da antena, sendo assim, definido como a razão entre a intensidade de irradiação de uma antena com perdas na direção do máximo e a intensidade de irradiação dessa mesma antena, considerando-a isotrópica.

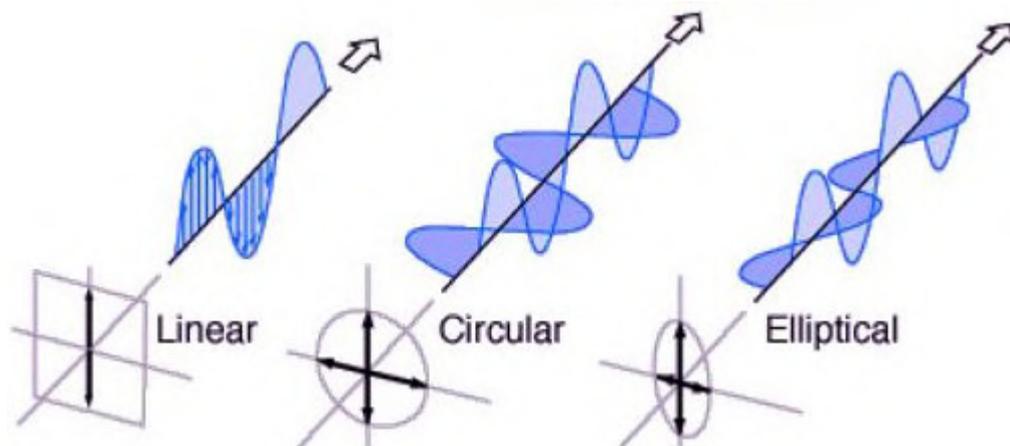
2.1.4 Polarização

A polarização de uma onda irradiada é definida como aquela propriedade de uma onda eletromagnética que descreve a magnitude relativa e a direção do vetor do campo elétrico variante no tempo; especificamente, representa a figura traçada em função do tempo pela extremidade do vetor em um local fixo no espaço, e o sentido em que ele é traçado, conforme observado ao longo da direção da propagação (BALANIS, 2016).

Ao considerar o vetor que descreve o campo elétrico em um ponto no espaço como uma função do tempo, sendo sempre direcionado ao longo de uma linha, seja vertical ou horizontal, o campo é dito linearmente polarizado.

Para a polarização circular, deve-se considerar um vetor campo elétrico na vertical e outro na horizontal, possuindo a mesma amplitude e que são eletricamente defasadas em 90° , com isso o resultado do vetor do campo elétrico, ao longo do tempo, é circular. Todos os demais casos, exceto estes citados anteriormente, são considerados elipticamente polarizados, como pode-se verificar na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Polarização linear, circular e elíptica da onda eletromagnética.



Fonte: (SANKAR, 2016)

2.1.5 Coeficiente de reflexão e largura de banda

O coeficiente de reflexão (Γ) é um parâmetro que descreve o quanto de uma onda é refletida de volta ao transmissor, antes de ser transmitida pela antena em uma faixa de frequência, conforme a equação 2.1.

$$|\Gamma|^2 = \frac{P_r}{P_t} \quad (2.1)$$

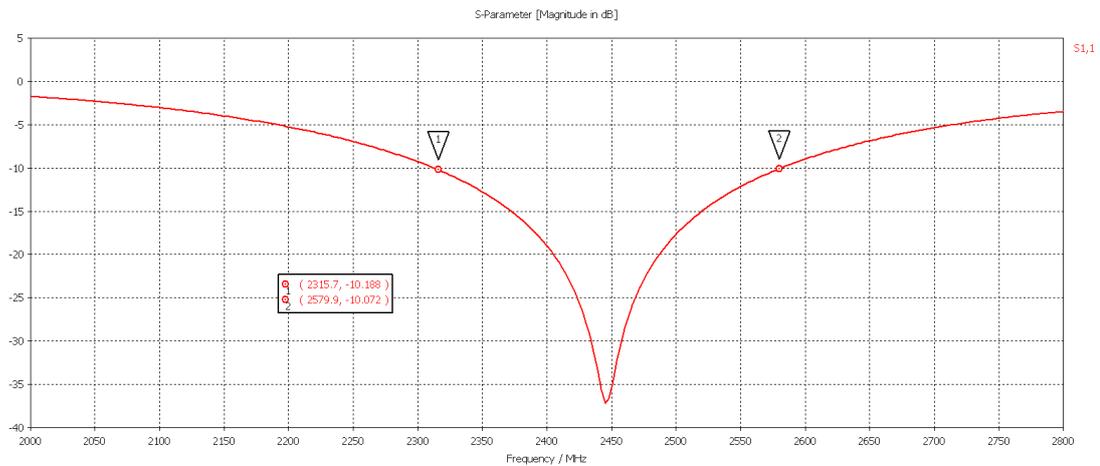
A partir do valor de Γ , pode-se chegar ao valor da perda de retorno (S11), conforme a equação 2.2.

$$S11_{dB} = 20 \log |\Gamma| = 10 \log \left| \frac{P_r}{P_t} \right| \quad (2.2)$$

Se o valor de S11, idealmente, for igual a 0 dB, implica que toda a potência inserida para ser transmitida na antena é refletida, com isso nada é irradiado para o meio. Com isso, para as antenas, considera-se o valor aceitável para transmissão com S11 menor ou igual a -10dB.

Como as antenas são projetadas por faixas de frequências, para serem de baixa perda, idealmente a maior parte da energia fornecida à antena é irradiado, conforme pode-se verificar na Figura 2.4, existe uma faixa em que o S11 está abaixo de -10 dB, onde essa diferença entre os pontos é chamada de Largura de Banda.

Figura 2.4 – Gráfico de S11 de uma antena.

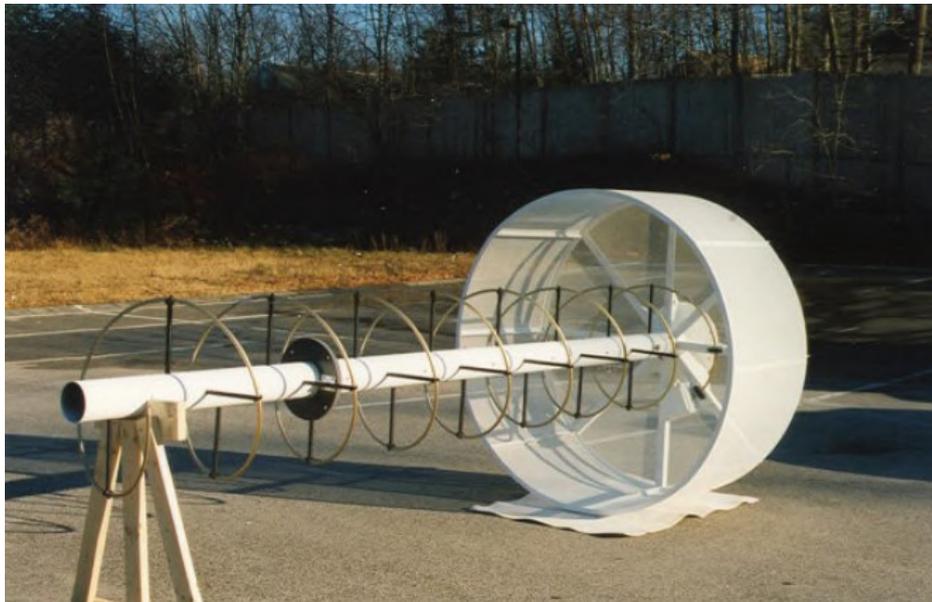


Fonte: (LIENAU, 2019).

2.1.6 Antenas helicoidais

A Antena helicoidal é um modelo no qual o fio condutor é enrolado formando uma hélice. Acoplada a esta hélice, existe um plano de terra, no qual normalmente é plano, porém, pode-se obter diversas outras formas. Um exemplo de uma antena helicoidal é vista na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Antena helicoidal comercial com um plano de terra em formato de concha.



Fonte: (BALANIS, 2016).

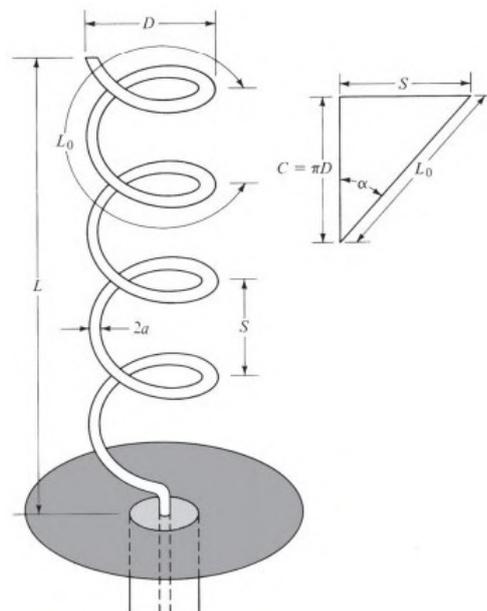
As antenas helicoidais são normalmente utilizadas em aplicações de telemetria espacial por satélites, espaçonaves e mísseis balísticos para transmitir ou receber sinais que passaram pela rotação de Faraday enquanto viajavam pela ionosfera (BALANIS,

2016).

Ou seja, durante o percurso de um satélite em órbita, o mesmo sofre *Spin Rotation*, no qual faz com que gire em seu próprio eixo axial. Caso utilizassem antenas com polaridade vertical ou horizontal, esse efeito iria ocasionar uma perda de sinal de transmissão/recepção na Terra. Com isso, através dessas antenas é possível irradiar campos com polarização circular, evitando a perda do sinal devido a polarização vertical ou horizontal.

A antena helicoidal tem as seguintes características estruturais, conforme a Figura 2.6.

Figura 2.6 – Antena helicoidal com plano terra.



Fonte: (BALANIS, 2016).

- N - Número de espiras;
- D - Diâmetro externo da hélice;
- r - Raio do fio da hélice;
- C - Circunferência da hélice ($C = \pi D$);
- α - Ângulo de passo ($\alpha = \arctan(S/C)$);
- S - Espaçamento da hélice ($S = C \tan \alpha$);
- L_0 - Comprimento do fio de uma espira ($L_0 = \sqrt{C^2 + S^2}$);
- L - Comprimento da antena ($L = NS$);

O filamento da hélice é normalmente conectado ao condutor central de uma linha de transmissão coaxial no ponto de alimentação, com o condutor externo da linha sendo conectado ao plano de aterramento (BALANIS, 2016).

As características de irradiação da antena helicoidal, variam ao realizar modificações das propriedades geométricas. Em relação a impedância de entrada da antena helicoidal, esta depende impreterivelmente do ângulo de passo e do tamanho total do fio condutor da hélice.

Existem diversos modos de transmissão nas antenas helicoidais, porém as principais delas são: normal e axial. O modo axial mais é prático e com melhores resultados, por alcançar uma maior largura de banda e fornecer a polarização circular.

2.1.6.1 Modo normal

No modo normal de operação da antena helicoidal, o campo irradiado é máximo no plano normal ao eixo da hélice e mínimo na direção do eixo da helice. conforme a Figura 2.7 (a).

Para utilizar a antena helicoidal no modo normal, deve-se construir a mesma com as hélices muito menor que o comprimento de onda ($NL_0 \ll \lambda_0$).

Considerando o espaçamento da antena helicoidal em seus extremos, obtêm-se duas formas diferentes de representação da antena. Ao considerar o pitch de 0° , a mesma aproxima-se de uma espira. Já considerando o pitch com 90° , o mesmo se torna um fio linear de comprimento S , conforme a Figura 2.7 (c). Então, durante o modo normal equivalente a uma estrutura com diversas antenas dipolo e espiras conectadas.

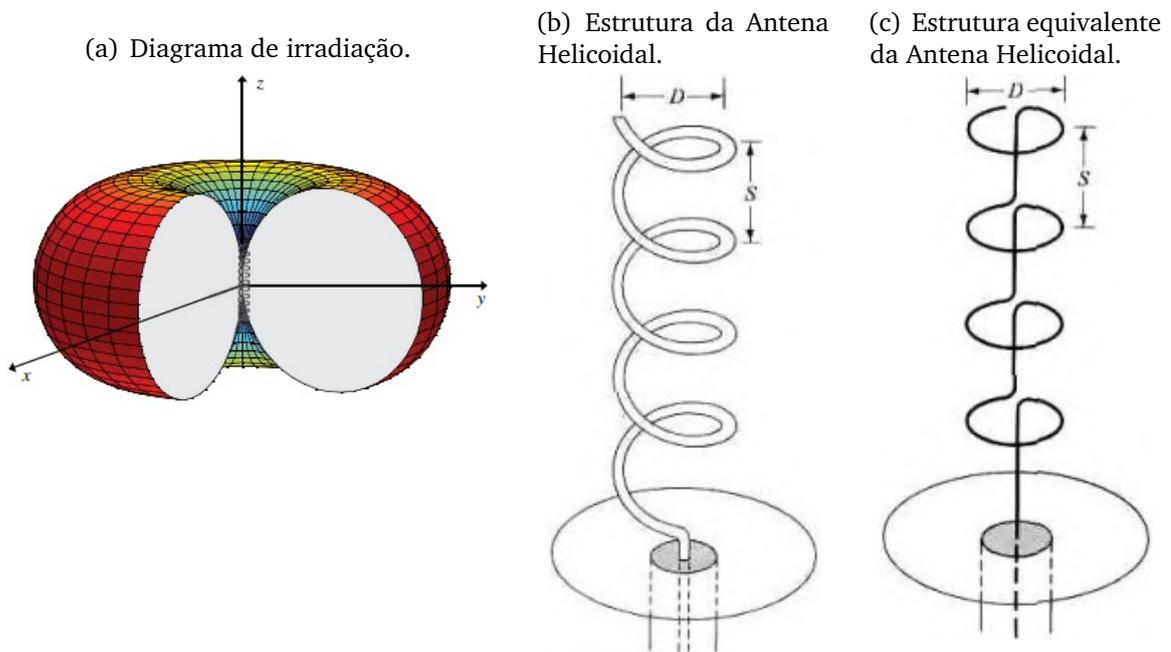
Os campos são obtidos pela sobreposição dos campos desses radiadores elementares. Os planos das curvas das hélices são paralelos entre si e perpendiculares aos eixos dos dipolos verticais. Os eixos dos *loops* e dipolos coincidem com o eixo da hélice (BALANIS, 2016).

2.1.6.2 Modo axial

No modo axial de operação, existe apenas um lóbulo principal de irradiação e sua intensidade máxima dá-se ao longo do eixo da hélice da antena helicoidal, conforme mostra a Figura 2.8.

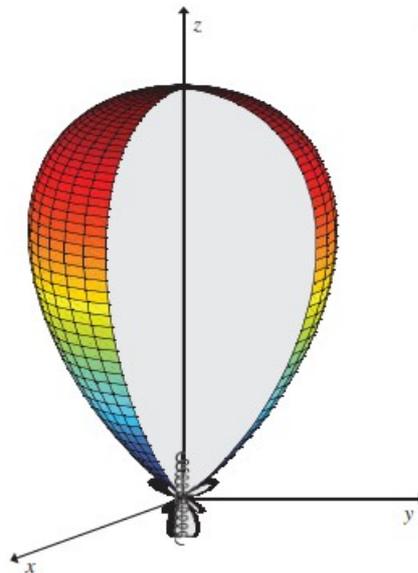
Para alcançar o modo axial, o diâmetro e o espaçamento devem ser frações do comprimento de onda a ser transmitido.

Figura 2.7 – Características e equivalência da antena helicoidal em modo normal.



Fonte: (BALANIS, 2016).

Figura 2.8 – Diagrama de irradiação da antena helicoidal em modo Axial.



Fonte: (BALANIS, 2016).

Para obter a polarização circular, principalmente no lóbulo principal, a circunferência da hélice deve estar na faixa de $\frac{3}{4} < \frac{C}{\lambda_0} < \frac{4}{3}$ (com o valor $\frac{C}{\lambda_0} = 1$ o melhor caso possível, e o espaçamento em torno de $S \simeq \frac{\lambda_0}{4}$. Normalmente o ângulo de inclinação está entre $12^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ$ (BALANIS, 2016).

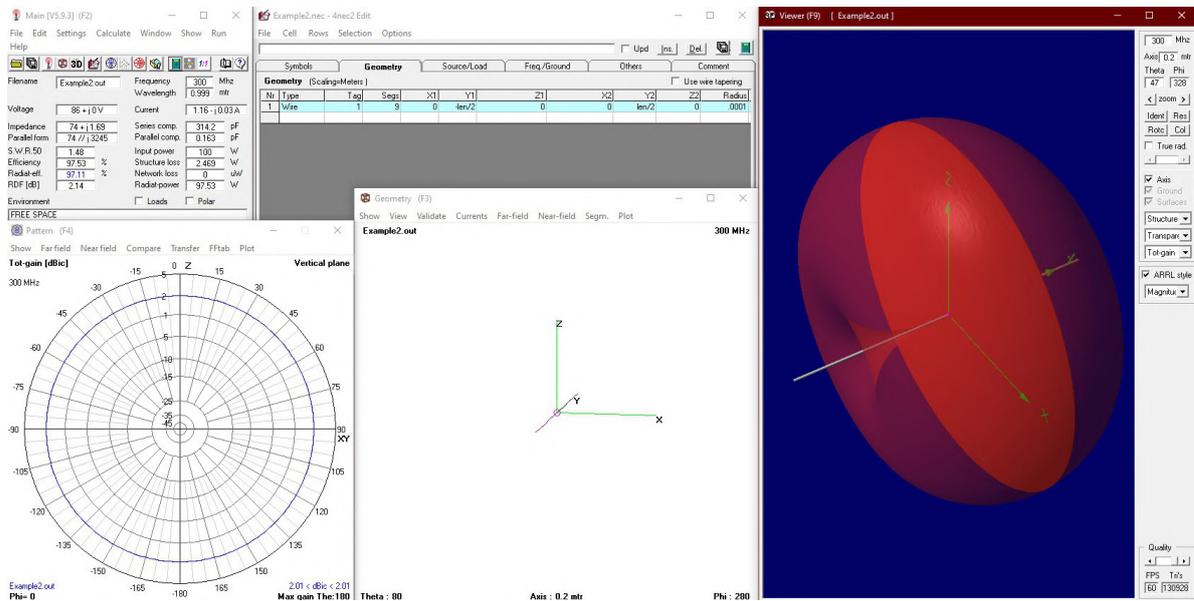
3 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

3.1 4NEC2

4NEC2 é uma ferramenta gratuita disponível para Windows, utilizando tecnologia de NEC2 (Numerical Electromagnetics Code 2) e NEC4 (Numerical Electromagnetics Code 4) (VOORS, 2021).

O 4NEC2 tem seu sistema embasado em diversas janelas, onde é possível criar, visualizar, otimizar, combinar, verificar estruturas geométricas de antenas, em 2D e 3D, gerar e exibir padrões de irradiação de campos próximos/distante e distribuição de corrente ao longo da geometria da antena, conforme pode-se observar na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Janelas do *software* 4NEC2.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* 4NEC2.

A geometria da antena pode ser criada ou editada com a ajuda de um editor diretamente no 4NEC2 ou um editor geométrico de acordo com a conveniência do usuário.

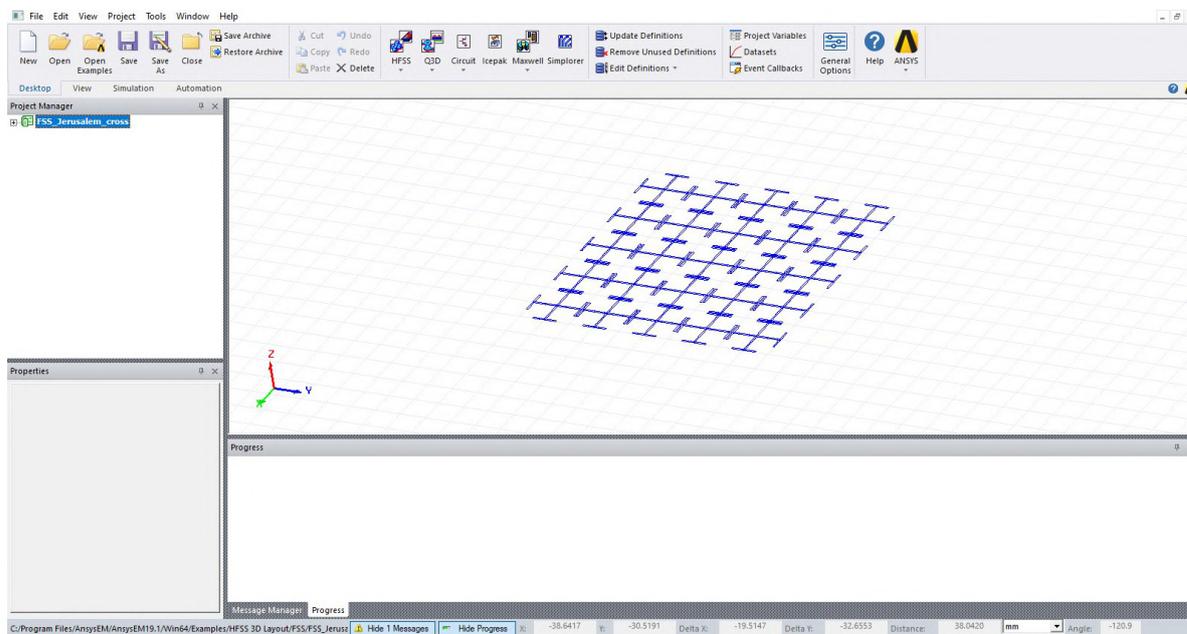
3.2 ANSYS HIGH-FREQUENCY STRUCTURE SIMULATOR

O ANSYS *High-Frequency Structure Simulator* (HFSS) é um software de simulação eletromagnética 3D para projetar e simular produtos eletrônicos de alta frequência, como antenas, arranjos de antenas, componentes de radiofrequência ou micro-ondas, interconexões de alta velocidade, filtros, conectores, e entre outros componentes.

O ANSYS HFSS utiliza-se do métodos de elementos finitos para o desenvolvimento e cálculo das estruturas eletromagnéticas, além de um processador de solução

automatizado, para o qual o usuário especifica a geometria, realizando a construção com uma aparência semelhante ao *Computer Aided Design* (CAD), definindo as propriedades do material e a faixa de frequência de solução necessária, conforme a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Janelas do *software* ANSYS HFSS.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* ANSYS HFSS.

O ANSYS HFSS traz diversos benefícios ao simular o comportamento de alta frequência de um circuito, garantindo uma alta precisão, redução de esforço de verificação do sistema, reduz a necessidade de construir vários protótipos dispendiosos, economizando tempo e dinheiro no desenvolvimento do produto.

4 METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada a caracterização experimental da antena helicoidal de cobre, conforme mostra a Figura 4.1. Para as medições foram utilizadas duas unidades da antena mencionada, que possuem uma frequência de ressonância em 5,8 GHz e uma largura de banda de 200,0 MHz, sendo esta na faixa entre 5,6 GHz até 5,8 GHz, conforme informado pelo fabricante (BANGOOD, 2021).

Figura 4.1 – Antena helicoidal de cobre.



Fonte: (BANGOOD, 2021).

Tabela 4.1 – Dados da antena helicoidal fornecido pelo fabricante.

Ressonância (GHz)	5,80
Largura de banda (MHz)	200,00
Ganho (dBi)	16,00

Fonte: (BANGOOD, 2021).

A partir das informações repassadas pelo fabricante, foi utilizado o equipamento Keysight ENA E5071C Network Analyzer, conforme a Figura 4.2, para a medição do coeficiente de reflexão de ambas as antenas.

Figura 4.2 – Keysight ENA E5071C Network Analyzer.



Fonte: (TECHNOLOGIES, 2013).

Ao fazer a conexão do conector SMA da antena helicoidal ao equipamento Keysight ENA E5071C, foi realizada a medição do coeficiente de reflexão, sendo utilizada a faixa de frequência iniciando em 1,0 GHz até 10,0 GHz.

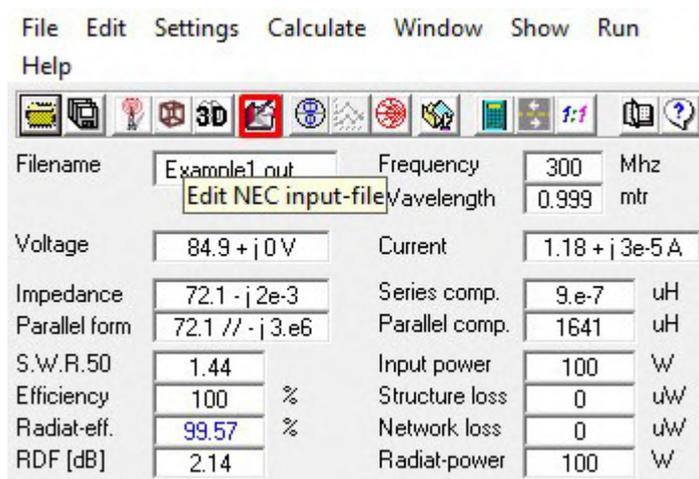
Então, realizou-se a exportação dos dados obtidos de coeficiente de reflexão. E assim, disponibilizando os dados das medições para realizar a plotagem da curva do S11 em um programa em Python. Os dados medidos serão disponibilizados no próximo capítulo.

Após a obtenção dos dados experimentais, foram obtidas as dimensões físicas das antenas helicoidais, para realizar a construção das antenas nos *softwares* 4NEC2 e ANSYS HFSS. Com isso, os seguintes valores foram obtidos:

- Diâmetro externo da hélice: 21,12 mm;
- Diâmetro interno da hélice: 19,12 mm;
- Raio do condutor: 1,00 mm;
- Passo entre espiras: 12,70 mm;
- Ângulo α : 12°;
- Número de espiras: \cong 6,25 espiras.

Então, com as informações das dimensões medidas da antena helicoidal, inicia-se o passo de criação do modelo utilizando o *software* 4NEC2. Ao abrir o programa, deve-se abrir o editor de geometria do 4NEC2, chamado *NEC input file*, localizado na barra principal do programa, conforme a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Abrir janela de edição de estruturas no 4NEC2.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* 4NEC2.

Com o *NEC input file* aberto, realizou-se a configuração das dimensões da hélice, sendo este conforme a Figura 4.4 (a). No mesmo editor, foram definidos a alimentação e o tipo de condutor da geometria criada, como mostrado na Figura 4.4 (b), configurações do plano de terra da antena e a frequência de ressonância, conforme a Figura 4.4 (c), em que foi obtida a partir do manual do fabricante, sendo esta 5,8 GHz.

Após salvar a construção da antena no *software* 4NEC2, foram realizados os cálculos de *frequency sweep* e *far field pattern* da estrutura. Para o *frequency sweep* foi definida a mesma faixa de frequência utilizada na medição utilizando o Keysight ENA E5071C, iniciando em 1,0 GHz e finalizando em 10,0 GHz. Já para o cálculo de *far field pattern*, foi definida a plotagem dos diagramas de irradiação vertical e horizontal. Ambos os resultados serão apresentados no capítulo posterior.

Ao finalizar a construção com o *software* 4NEC2, realizou-se a construção da antena utilizando o *software* ANSYS HFSS. Para isso, foi utilizado o sistema de *Antenna Toolkit* que o próprio *software* possui, sendo este disponível na barra de tarefas em *View -> ACT Extensions*.

Ao abrir a aba do *ACT Extensions*, é necessário entrar na opção de *Launch Wizards*, dentre elas estará o *HFSS Antenna Toolkit*, assim, disponibilizando diversos modelos de antenas para iniciar a construção, e dentre elas a antena helicoidal (*helix*).

Ao carregar a antena helicoidal, faz-se necessário alterar as dimensões e o material do corpo da antena. Para alterar o material, basta clicar no corpo da antena e designar o material a ser utilizado. Já as dimensões, estão parametrizadas em variáveis adicionada no sistema, conforme pode-se observar na Figura 4.5.

Para alterar o valor das variáveis, deve-se entrar em *HFSS -> Design Properties*,

Figura 4.4 – Configuração da antena helicoidal no 4NEC2.

(a) Configuração de dimensões.

Symbols		Geometry				Source/Load	Freq./Ground			Others	Comment
Geometry (Scaling=Meters)											
<input type="checkbox"/> Use wire tapering											
Nr	Type	Tag	Segs	Spacing	Length	Rad:X1	Rad:Y1	Rad:X2	Rad:Y2	Wire-rad	
1	Helix	1	200	0.0127	0.079375	0.01056	0.01056	0.01056	0.01056	0.0005	
2	Copy/move	0	0	0	0	0	0	0	0.0052	0	
3	Wire	2	1	0.01056	0	0	0.01056	0	0.0052	0.0005	
4											

(b) Configuração de alimentação e tipo de condutor da antena helicoidal.

Symbols		Geometry				Source/Load			Freq./Ground			Others	Comment
Source(s)													
<input checked="" type="checkbox"/> Show source <input checked="" type="checkbox"/> Show loads <input type="checkbox"/> Show Tr-line													
Nr	Type	Tag	Seg	(opt)	Real	Imag	Magn	Phase	(norm)	comment			
1	Voltage-src	2	50%	0	1	0	1	0	0				
2													
Load(s)													
Nr	Type	Tag-nr	First-seg	Last-seg	Cond (S)					comment			
1	Wire-conduc	0	0	0	Copper								

(c) Configuração de aterramento da antena helicoidal.

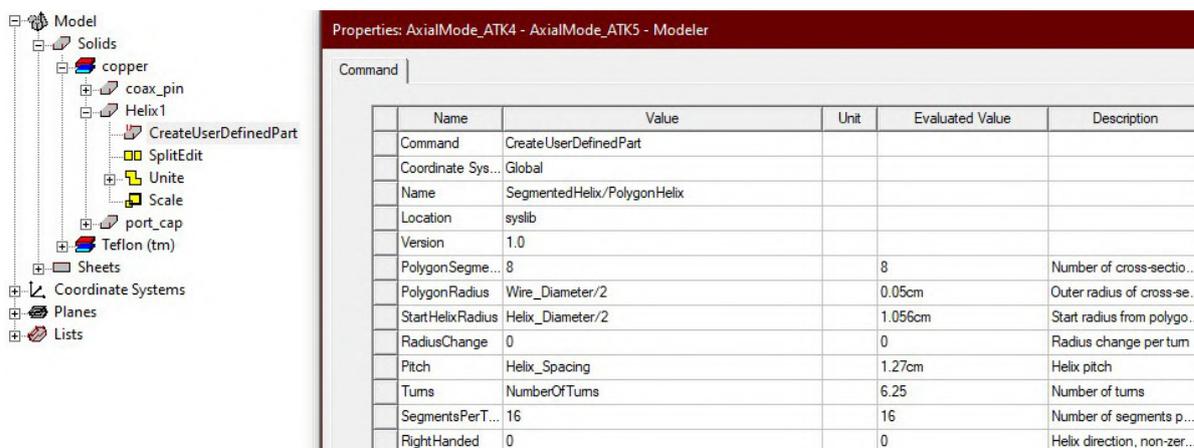
Symbols		Geometry				Source/Load	Freq./Ground			Others	Comment
Frequency											
Frequency		5800 Mhz									
Nr steps		<input type="text"/>									
Stepsize		<input type="text"/>									
		<input type="checkbox"/> Sweep									
Environment											
Ground / Free-space		Perfect gnd									
<input checked="" type="checkbox"/> Connect wire(s) for Z=0 to ground											
Main ground											
Ground type		<input type="text"/>									
Conductivity		<input type="text"/>									
Dielectric constant		<input type="text"/>									
		<input type="checkbox"/> Use ground-screen									
		<input type="checkbox"/> Use second ground									
Ground screen											
Nr of radials		<input type="text"/>									
Radial length		<input type="text"/> mtr									
Wire radius		<input type="text"/> mm									
Second ground											
Ground type		<input type="text"/>									
Conductivity		<input type="text"/>									
Dielectric constant		<input type="text"/>									
Distance		<input type="text"/> mtr									
Depth		<input type="text"/> mtr									
		<input type="radio"/> Circular boundary									
		<input type="radio"/> Perpendicular to Y-axis									

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software 4NEC2.

sendo dado em centímetros, conforme a Figura 4.6.

Após isso, é necessário adicionar um tipo de análise a ser executada, localizada na barra lateral esquerda, em *Analysis*, sendo este capaz de definir a frequência central da análise e também para que possa adicionar a *frequency sweep*, variando novamente de 1,0 GHz até 10,0 GHz. Além do *frequency sweep*, deve-se adicionar o *radiation*, sendo *infinite sphere*, localizado em *far field setup*, com os valores de ϕ variando de 0° até 90°, com um passo de 90° e os valores de Θ variando de 0° até 360°, com um passo de 3°, conforme a Figura 4.7.

Figura 4.5 – Configuração de dimensões da antena helicoidal no ANSYS HFSS.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* ANSYS HFSS.

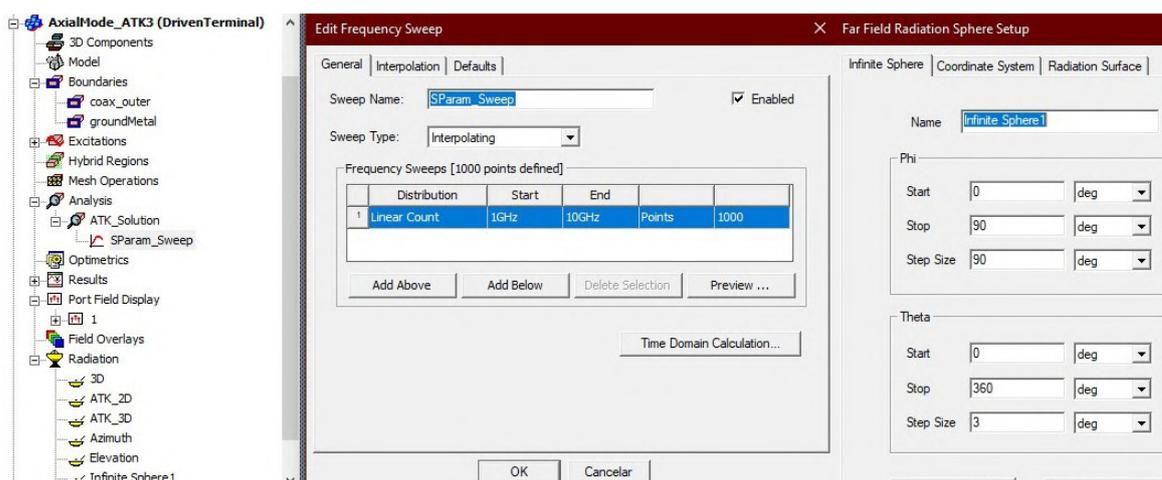
Os valores de ϕ definem qual o diagrama de irradiação que será plotado, no qual para ϕ igual a 0° , representa o plano vertical e para ϕ igual a 90° , representa o plano horizontal.

Figura 4.6 – Alteração das variáveis de dimensão da antena helicoidal no ANSYS HFSS.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type
-Antenna Dimensions				
Helix_Diameter	2.112	cm	2.112cm	Design
Helix_Spacing	1.27	cm	1.27cm	Design
Wire_Diameter	0.1	cm	0.1cm	Design
NumberOfTums	6.25		6.25	Design
-Feed Dimensions				
coax_inner_rad	0.045	cm	0.045cm	Design
coax_outer_rad	0.152	cm	0.152cm	Design
feedLength	1	cm	1cm	Design
Pin_Length	0.055	cm	0.055cm	Design
Pin_Diameter	0.091	cm	0.091cm	Design
-Ground Plane Dimensions				
groundX	4.428	cm	4.428cm	Design
groundY	4.428	cm	4.428cm	Design

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* ANSYS HFSS.

Figura 4.7 – Configuração de solução no ANSYS HFSS.



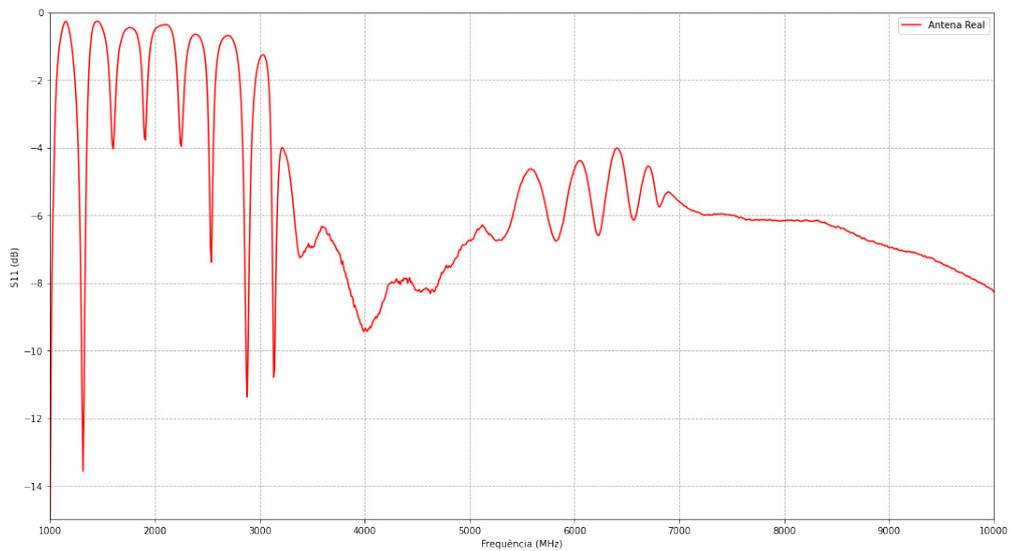
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software ANSYS HFSS.

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

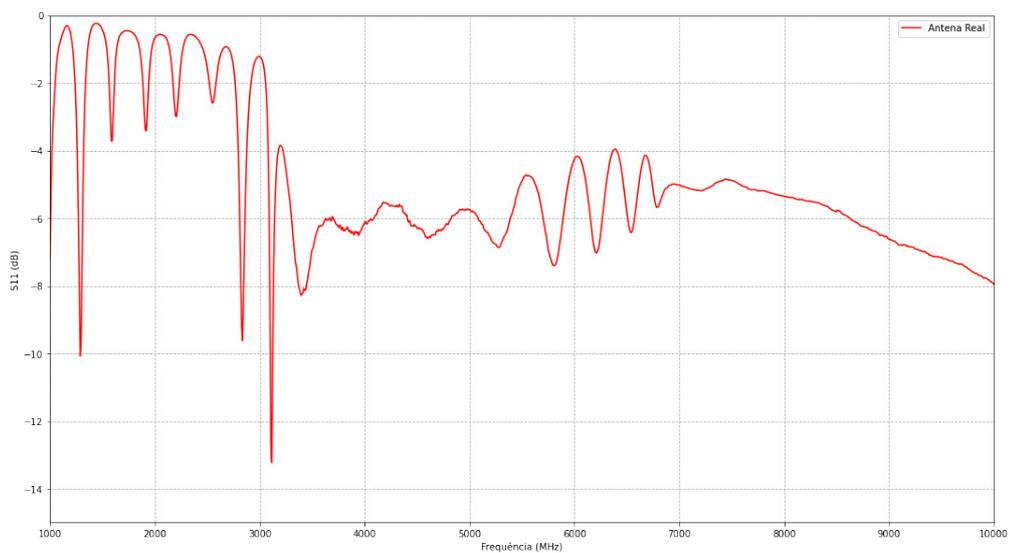
Inicialmente foram realizadas as medições das duas antenas helicoidais utilizando o Keysight ENA E5071C Network Analyzer, gerando os seguintes dados de coeficiente de reflexão, conforme as Figuras 5.1 e 5.2.

Figura 5.1 – Gráfico do S11 da primeira antena helicoidal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.2 – Gráfico do S11 da segunda antena helicoidal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No primeiro gráfico (Figura 5.1), foram identificadas três ressonâncias, sendo elas em 1,32 GHz, 2,88 GHz e 3,13 GHz, com uma largura de banda respectivamente de 27,00 MHz, 21,00 MHz e 14,00 MHz.

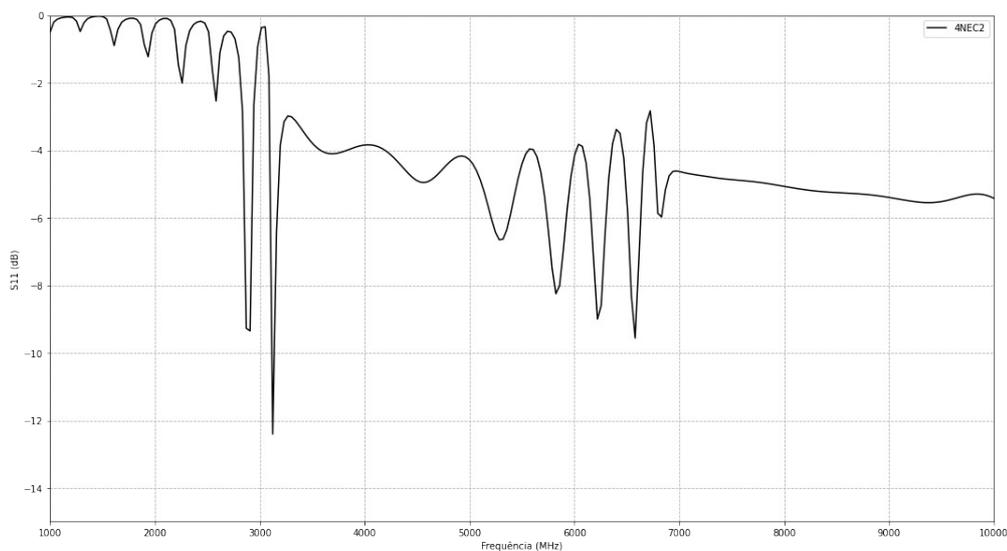
Para o segundo gráfico (Figura 5.2), houveram duas ressonâncias, sendo a primeira ressonância na frequência de 1,29 GHz e a segunda ressonância em 3,12 GHz, com uma largura de banda de 2,42 MHz e 22,00 MHz respectivamente em cada ressonância.

5.2 CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA

5.2.1 4NEC2

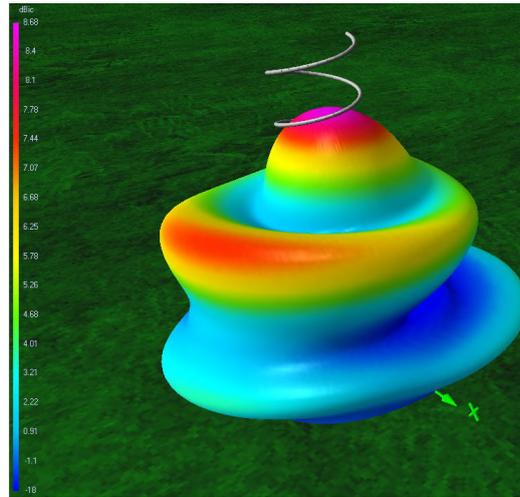
Após a caracterização experimentalmente, realizou-se a plotagem do gráfico de coeficiente de reflexão e o diagrama de irradiação 3D e 2D (vertical e horizontal), utilizando o *software* 4NEC2, conforme as Figuras 5.3, 5.4 e 5.5.

Figura 5.3 – Gráfico do S11 da antena helicoidal utilizando o *software* 4NEC2.



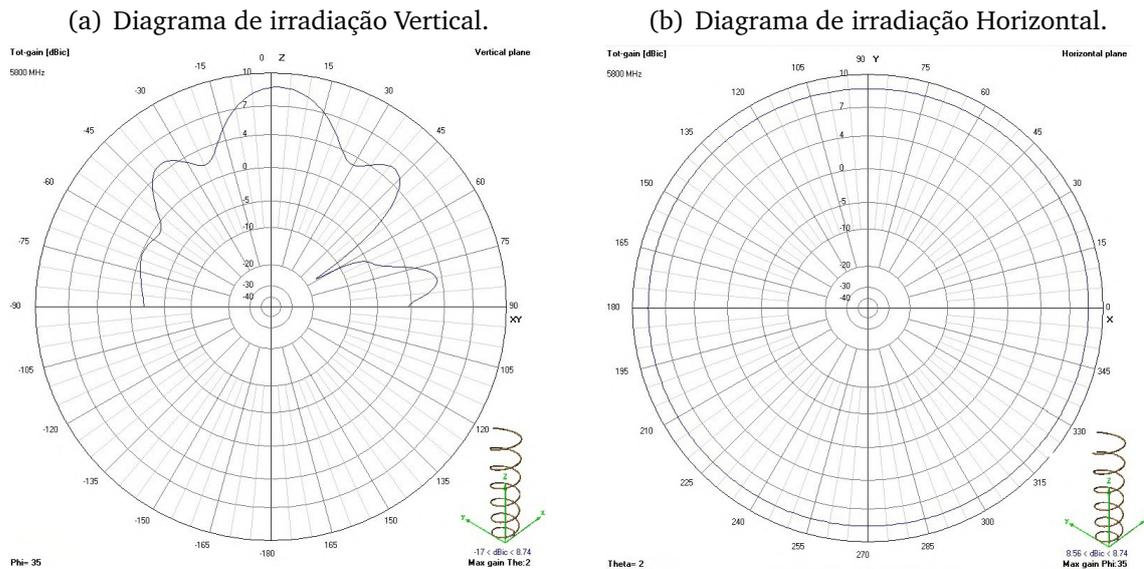
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* 4NEC2.

Figura 5.4 – Diagrama de irradiação 3D da antena helicoidal no 4NEC2.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* 4NEC2.

Figura 5.5 – Diagrama de irradiação 2D da antena helicoidal no 4NEC2.



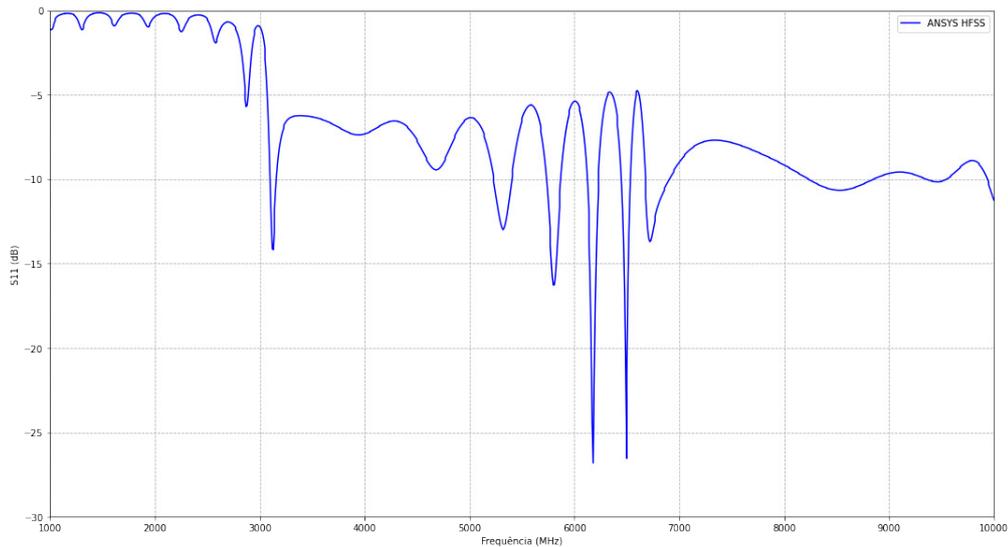
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* 4NEC2.

Pode-se observar que o resultado do coeficiente de reflexão da simulação utilizando o *software* 4NEC2 (Figura 5.3), em relação ao resultado medido (Figuras 5.1 e 5.2), existe uma semelhança na curva gerada com a ressonância em 3,13 GHz e possuindo uma largura de banda de 22,62 MHz. Já na Figura 5.5 (a), mostra um ganho de 8,74 dBic, sendo este, na direção de transmissão da antena helicoidal, conforme pode-se observar no diagrama de irradiação 3D (Figura 5.4).

5.2.2 ANSYS HFSS

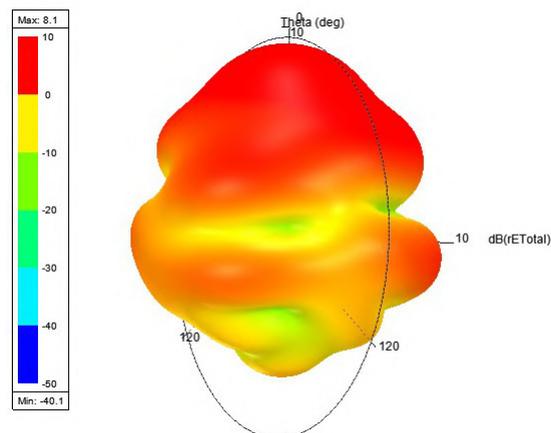
Após a obtenção dos dados numericamente com o *software* 4NEC2, foi realizada a plotagem do gráfico de coeficiente de reflexão e o diagrama de irradiação 3D e 2D (vertical e horizontal), utilizando o *software* ANSYS HFSS, conforme as Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

Figura 5.6 – Gráfico do S11 da antena helicoidal utilizando o *software* ANSYS HFSS.



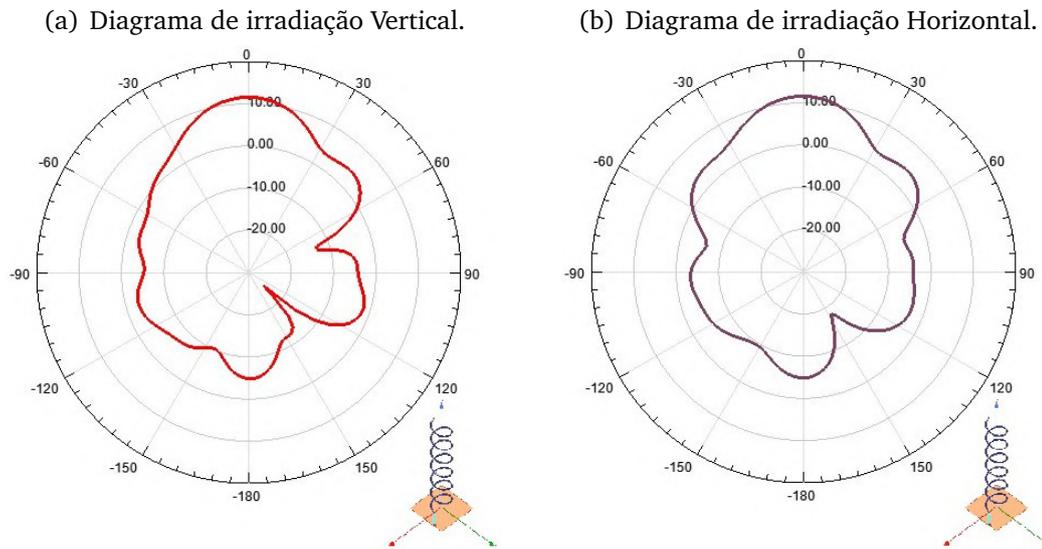
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.7 – Diagrama de irradiação 3D no ANSYS HFSS.



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* ANSYS HFSS.

Figura 5.8 – Diagrama de irradiação 2D no ANSYS HFSS.



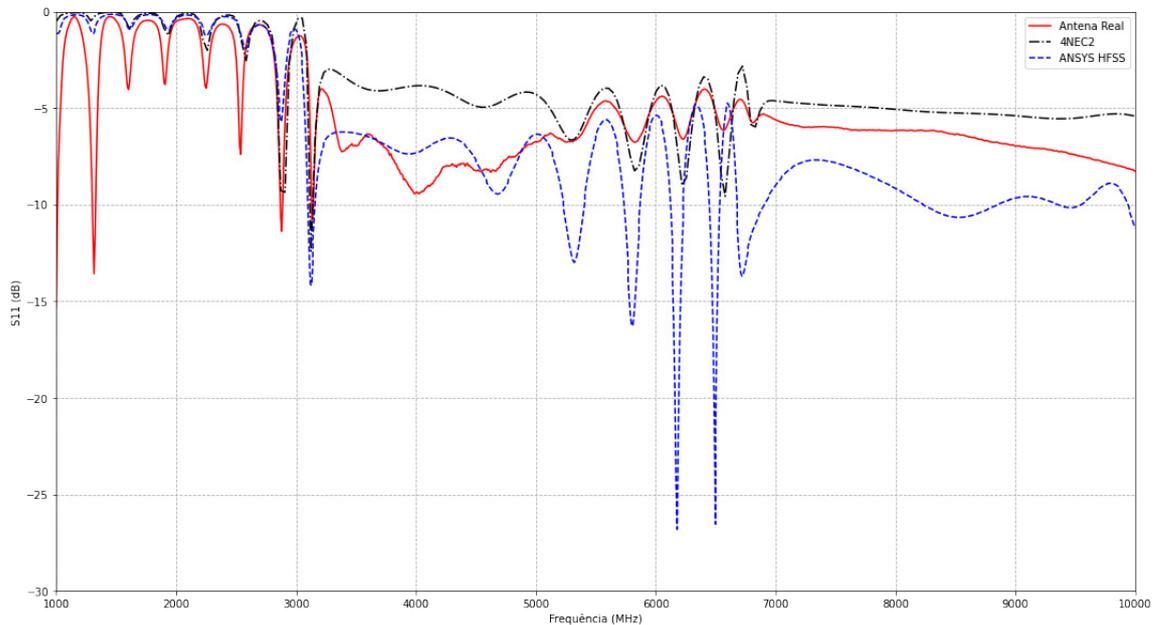
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* ANSYS HFSS.

Assim como apresentou-se na caracterização numérica, utilizando do *software* 4NEC2, é possível observar que o resultado do coeficiente de reflexão da simulação utilizando o ANSYS HFSS (Figura 5.6), em relação aos resultados medidos (Figuras 5.1 e 5.2), existe uma semelhança na curva com uma ressonância em 3,124 GHz e possuindo uma largura de banda de 58,74 MHz. A Figura 5.8 (a) apresenta um ganho aproximado de 10,75 dBiC, sendo este, na direção de propagação, conforme pode-se observar no modelo 3D na Figura 5.7.

5.3 ANÁLISE DOS DADOS

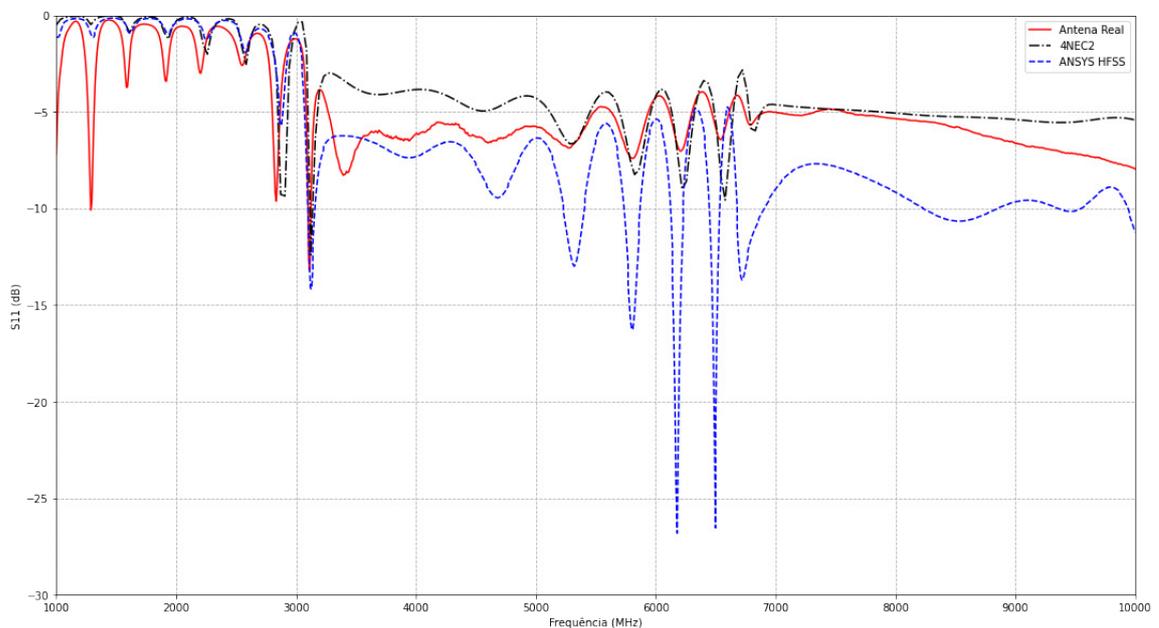
Para uma melhor análise dos dados, foram plotados os gráficos gerados numericamente juntamente com o gráfico gerado experimentalmente. Sendo assim, estes conforme as Figuras 5.9 e 5.10, respectivamente da primeira e da segunda antena helicoidal.

Figura 5.9 – Gráficos sobrepostos do S11 da primeira antena helicoidal com os resultados simulados e medidos (Antena Real).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.10 – Gráficos sobrepostos do S11 da primeira antena helicoidal com os resultados simulados e medidos (Antena Real).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambos os gráficos foram identificadas a ressonância em 3,12 GHz, com a largura de banda próxima ao caracterizado numericamente, mostrando uma eficiência no resultado das curvas do S11 que caracterizados experimentalmente e numericamente. O comparativo dos valores de ressonância pode-se observar nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Dados de ressonância entre a primeira antena helicoidal medida e os softwares 4NEC2 e Ansys HFSS.

Tipo	Ressonância (GHz)	Variação	Largura de banda (MHz)	Variação
Antena 1	3,133	-	14,000	-
4NEC2	3,130	-0,096%	22,620	61,571%
HFSS	3,124	-0,288%	58,740	319,571%

Autor: Elaborado pelo autor.

Tabela 5.2 – Dados de ressonância entre a segunda antena helicoidal medida e os softwares 4NEC2 e Ansys HFSS.

Tipo	Ressonância (GHz)	Variação	Largura de banda (MHz)	Variação
Antena 2	3,115	-	22,000	-
4NEC2	3,130	0,482%	22,620	2,818%
HFSS	3,124	0,289%	58,740	167,000%

Autor: Elaborado pelo autor.

Além disso, a plotagem das curvas do S11 que foram caracterizadas experimentalmente, em ambas as antenas, e que foram caracterizadas numericamente apresentam semelhança em toda a faixa de frequência.

Por outro lado, os dados informados pelo fabricante não apresentam semelhança com a caracterização experimental e numérica, tendo em vista que seria disponibilizada uma ressonância em 5,8 GHz, com uma largura de banda de 200 MHz.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os resultados das antenas helicoidais que foram caracterizadas numericamente, nos *softwares* 4NEC2 e ANSYS HFSS, em comparação a caracterização experimental, os resultados foram bastante satisfatórios, apresentando uma consistência aos dados de coeficiente de reflexão e dos diagramas de irradiação que foram plotados, além dos valores da frequências de ressonância e a largura de banda que estiveram próximos.

Com relação as informações repassados pelo fornecedor das antenas helicoidais não foram equivalentes, tendo em vista que a frequência de ressonância seria em 5,8 GHz e seriam disponibilizados 200 MHz de largura de banda, sendo este na faixa de 5,6 GHz até 5,8 GHz, onde as caracterizações experimentalmente e numericamente demonstram o contrário.

Em relação ao esforço computacional requerido, para ambos os *softwares*, o 4NEC2 apresenta os resultados em menor tempo, tendo em vista que apresenta uma configuração estática das hélices. Já o *software* ANSYS HFSS, contém um conjunto de criação de antena mais robusto e com uma maior variedade de possibilidades de formatos e geometrias, além do nível de precisão que o software pode oferecer. Neste caso, para a construção mais simples, como uma antena helicoidal, o 4NEC2 já é capaz de trazer um ótimo resultado em menor tempo.

Para objeto de estudos futuros faz-se necessário investigar, utilizando inclusive mais programas de simulação eletromagnética, o esforço computacional requerido em relação ao resultado obtido para ambas as caracterizações, utilizando variados modelos de antenas e com maior complexidade de geometrias.

REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A. *Antenna theory: analysis and design*, 2. ed. New Jersey (United States): [s.n.], 2016. 1072 p.
- BANGGOOD. *WYFPV 5.8G 16DBi RHCP Direcional Espiral Mola Helicoidal FPV Antena 11cm RP-SMA / SMA*. 2021. Disponível em: <https://www.banggood.com/pt/WYFPV-5_8G-16DBi-RHCP-Directional-Spiral-Spring-Helical-FPV-Antenna-11cm-RP-SMA-or-SMA-p-1184374.html?mmds=myorder&cur_warehouse=CN&ID=511532>. Acesso em: ago. 2021.
- GODINHO, H. F. *Uma abordagem sobre a tecnologia 4G LTE e sua aplicação no Brasil*. 2018. Disponível em: <<https://semanaacademica.com.br/artigo/uma-abordagem-sobre-tecnologia-4g-lte-e-sua-aplicacao-no-brasil>>. Acesso em: nov. 2022.
- LIENAU, J. *Understanding Antenna Design*. 2019. Disponível em: <<https://www.lairdconnect.com/resources/white-papers/understanding-antenna-design>>. Acesso em: dez. 2022.
- NOBEL. *Guglielmo Marconi Biographical*. 2022. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1909/marconi/biographical/>>. Acesso em: nov. 2022.
- ROY, S. *Antena helicoidal: 7 fatos importantes que você deve saber*. 2022. Disponível em: <<https://pt.lambdageeks.com/helical-antenna/>>. Acesso em: nov. 2022.
- SANKAR, J. *Antenna Polarisation*. 2016. Disponível em: <<https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/antenna-polarisation>>. Acesso em: nov. 2022.
- STUTZMAN, W. L. *Antenna theory and design*: , 2. ed. United States: [s.n.], 1997.
- TAMMANNAGARI, R. R. *Design and development of structurally feasible small unmanned aerial vehicles*. Kentucky (United States): [s.n.], 2010. Disponível em: <https://uknowledge.uky.edu/gradschool_theses/5/>. Acesso em: nov. 2022.
- TECHNOLOGIES, A. *Agilent E5071C ENA E5071C Network Analyzer*. 2013. Disponível em: <<https://www.techrentals.com.au/uploads/AGI,E5071C.pdf>>. Acesso em: dez. 2022.
- UNESP. *Ondas e Linhas de Comunicações*. 2018. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/optoeletronica/capitulo-5---linhas-de-transmissao-loe.pdf>>. Acesso em: nov. 2022.
- VOORS, A. *4NEC2 antenna modeler and optimizer*. 2021. Disponível em: <<https://www.qsl.net/4nec2/>>. Acesso em: dez. 2022.

Documento Digitalizado Restrito

TCC - Caracterização de uma antena helicoidal comercial [Corrigido]

Assunto: TCC - Caracterização de uma antena helicoidal comercial [Corrigido]
Assinado por: Rilbert Lima
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Restrito
Hipótese Legal: Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Rilbert Lima da Silva, ALUNO (20151610228) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 03/07/2023 14:57:43.

Este documento foi armazenado no SUAP em 03/07/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 867880

Código de Autenticação: bd46a7a402

