

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

MATHEUS GALLI LALLI

Design de Antenas Helicoidais Para Operação na Banda X

São João da Boa Vista

2021

Matheus Galli Lalli

Design de Antenas Helicoidais Para Operação na Banda X

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações .

Orientador: Prof^o Dr. Rafael Abrantes Penchel

São João da Boa Vista

2021

L198d Lalli, Matheus Galli
 Design de antenas helicoidais para operação na banda X
 / Matheus Galli Lalli. -- São João da Boa Vista, 2022
 65 p. : il., tabs., fotos

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado -
 Engenharia de Telecomunicações) - Universidade
 Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São
 João da Boa Vista, São João da Boa Vista
 Orientador: Rafael Abrantes Penchel

 1. Telecomunicações. 2. Sistemas de comunicação em
 banda larga. 3. Simulação (Computadores). I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESIGN DE ANTENAS HELICOIDAIS PARA OPERAÇÃO NA BANDA X

Aluno: Matheus Galli Lalli
Orientador: Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel

Banca Examinadora:

- Rafael Abrantes Penchel (Orientador)
- Ivan Aritz Aldaya Garde (Examinador)
- Renan Alves dos Santos (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 100/2021)

São João da Boa Vista, 15 de dezembro de 2021

DADOS CURRICULARES

MATHEUS GALLI LALLI

NASCIMENTO 17/05/1996

FILIAÇÃO Marcos Lalli
Raquel de Sousa Galli Lalli

2014 / 2021 Graduação em Engenharia Eletrônica e de
Telecomunicações
UNESP-SJBV

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força para superar todos os momentos difíceis e também essa longa jornada até aqui.

Aos meus familiares por todo apoio, em especial a minha irmã, Priscila de Souza Galli Lalli e minha mãe, Raquel de Sousa Galli Lalli, por estarem presentes nos momentos mais difíceis. Também a minha namorada Stefany Felix Secundino, ao meu tio Durval de Sousa Galli pelo apoio incondicional e a minha avó Maria Aparecida de Souza, por sempre acreditar em mim.

Aos meus amigos que adquiri durante o curso, especialmente ao Lucas Eugênio da Costa, por todo apoio e ensinamentos de vida. Também ao Paulo Cruz Pinheiro de Moraes, Larissa Rejane Frenhan, Pedro Guilherme de Almeida Alves Pereira, Atila Devechi Matias, Leonardo Marques Pereira Peres e Homero de Oliveira Assaloni.

Ao meu orientador Prof^o Dr. Rafael Abrantes Penchel, por toda paciência, dedicação e apoio.

Aos membros da Powerwave Brazil, em especial ao Luis Alberto Annicchino, Rogério das Neves Silva e Adriana Salgado. Também ao Gustavo Kretschmer da Sunwave Communications e Felipe Santos Ferreira da Digital Telecomunicações.

*"Mas os que esperam no Senhor renovarão as forças, subirão com asas como águias; correrão, e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão."
(Isaías 40:31)*

RESUMO

As antenas helicoidais são antenas amplamente utilizadas para aplicações relacionadas as áreas da astronomia e aeroespacial, pois possui vantagens como operação em banda larga, maior diretividade e operação com ondas circularmente polarizadas. Com uma alta demanda por otimização de dispositivos, em termos de tamanho, peso e melhores características de operação, a otimização de antenas helicoidais também se faz necessária, visto sua aplicação em áreas que exigem o melhor desempenho possível. Com isso, diversas técnicas podem ser pesquisadas e aplicadas visando essa melhora. Neste trabalho foram analisados alguns estudos realizados até o momento, relacionados as antenas helicoidais com ângulo de pitch não-uniforme, bem como antenas que operam na Banda X. Para entender o funcionamento desse tipo de antenas, primeiramente foram realizados estudos sobre as antenas helicoidais convencionais, seus modos de operação e suas características de funcionamento, focando principalmente nas antenas que operam no modo axial, no qual a irradiação se dá de forma direcional. Posteriormente foram realizados estudos acerca de antenas helicoidais com ângulo de pitch não-uniforme, baseadas nas equações construtivas propostas, para verificar seus parâmetros de operação e desempenho, aplicando-se análises paramétricas do modelo. Essas análises foram feitas através de modelos desenvolvidos nos software Ansys HFSS, que possibilitou a simulação de operação de cada caso.

PALAVRAS-CHAVE: Antenas Helicoidais. Ângulo de Passo Não Uniforme. Polarização Circular. Ansys HFSS.

ABSTRACT

Helical antennas are antennas used for related applications such as astronomy and aerospace due to advantages such as broadband operation, better directivity and operation with circularly polarized waves. With a high demand for device optimization, in terms of size, weight and better operating characteristics, the optimization of helical antennas is also necessary, since its application in areas that seek the best possible performance. With that, several techniques can be researched and specified this improvement. In this work, some studies have been carried out so far, related to helical antennas with non-uniform pitch angle, as well as antennas that operate in the X-Band. of operation and its operating characteristics, focusing mainly on antennas that operate in the axial mode, in which the irradiation takes place in a directional way. Subsequently, studies were carried out on helical antennas with non-uniform pitch angle, based on the proposed constructive equations, to verify their operating and performance parameters, applying parametric analysis of the model. These analyzes were performed using models developed in the Ansys HFSS software, which enabled a simulation of the operation of each case.

KEYWORDS: Helical Antennas. Non-Uniform Pitch Angle. Circular Polarization. Ansys HFSS.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Motivação e Justificativa	12
1.2	Revisão Bibliográfica	14
1.3	Objetivos	20
1.4	Organização do trabalho	20
2	DESIGN DE ANTENAS HELICOIDAIS	21
2.1	Parâmetros Construtivos	22
2.1.1	Plano Terra	22
2.1.2	Diâmetro do Condutor da Hélice	22
2.1.3	Diâmetro da Hélice	23
2.1.4	Circunferência da Hélice	23
2.1.5	Ângulo de Pitch	23
2.1.6	Passo da Hélice	23
2.1.7	Comprimento de Uma Volta	23
2.1.8	Comprimento Total do Condutor da Hélice	24
2.1.9	Distância Entre a Hélice e o Plano Terra	24
2.1.10	Número de Voltas	24
2.2	Design Para o Modo Normal	24
2.2.1	Exemplo de Projeto de Uma Antena no Modo Normal	27
2.3	Design Para o Modo Axial	29
2.3.1	Exemplo de Projeto de Uma Antena Helicoidal no Modo Axial	34
3	ANTENAS HELICOIDAIS COM ÂNGULO DE PITCH NÃO-UNIFORME .	41
3.1	Geometria de Antenas Helicoidais não-uniformes	41
3.1.1	Casos Particulares	41
3.1.1.1	Geometria Convencional	41
3.1.1.2	Geometria Com Passo de Hélice Uniforme e Raio Crescente de forma Linear . . .	42
3.1.2	Geometrias Com Raio Crescente	43
3.1.2.1	Geometria Com $\alpha_\rho = 0$ e $\alpha_z \neq 0$	43
3.1.2.2	Geometria Com $\alpha_\rho \neq 0$ e $\alpha_z = 0$	44
3.1.2.3	Geometria Com $\alpha_\rho \neq 0$ e $\alpha_z \neq 0$	45
3.1.3	Geometria Com Raio Decrescente	47
3.2	Análise de Antenas Helicoidais Com Raio Crescente	50
3.2.1	Análise de Antenas Helicoidais Variando-se o Parâmetro α_z	50
3.2.2	Análise de Antenas Helicoidais Variando-se o Parâmetro α_ρ	52
3.2.2.1	Análise de uma Antena Helicoidal Com $\alpha_\rho \leq 0$	52

3.2.2.2	Análise de uma Antena Helicoidal Com $\alpha_\rho \geq 0$	54
3.3	Análise de Antenas Helicoidais Com Raio Decrescente	57
3.3.0.1	Análise de uma Antena Helicoidal Com $\alpha_\rho \leq 0$	57
3.3.0.2	Análise de uma Antena Helicoidal Com $\alpha_\rho \geq 0$	59
3.3.0.3	Análise de Antenas Helicoidais Variando-se os Parâmetros α_ρ e α_z	61
4	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As antenas helicoidais foram inicialmente projetadas por John Daniel Kraus. Sua idealização se deu no ano de 1946, após Kraus assistir uma apresentação concebida por um palestrante convidado sobre Tubos de Ondas Viajantes, na Universidade Estadual de Ohio. Até então, hélices de diâmetro com dimensões de frações de um comprimento de onda, já haviam sido testadas como antenas, mas sem sucesso. Neste mesmo dia, Kraus construiu em sua casa uma hélice de 7 voltas, com circunferência da hélice equivalente a um comprimento de onda, dotada de um plano terra, a qual produziu uma onda circularmente polarizada com feixe direcional. Alguns anos depois, em 1951, Kraus também aplicou antenas helicoidais na construção de um radiotelescópio, a fim de se mapear o céu através da radiofrequência. Tempos depois, o uso da antena helicoidal no modo axial se popularizou rapidamente, sendo utilizada em diversos tipos de satélites, para diversas aplicações, como por exemplo, GPS, meteorologia e rastreamento, empregada em variadas configurações e frequências de operação. Também encontrou utilidade em sondas espaciais enviadas a diversos lugares do espaço (KRAUS; MARHEFKA, 2002). Todos esses fatos evidenciam a forte utilidade das antenas helicoidais em aplicações relacionadas à astronomia.

As antenas helicoidais podem operar com um feixe direcional (modo axial), ou também de modo omnidirecional (modo normal), característica que depende de suas dimensões em relação ao comprimento de onda na frequência de operação. Possuem como principais vantagens, quando operando no modo axial, a capacidade de operação em banda larga de aproximadamente 2:1, o que significa que sua frequência superior é duas vezes maior que sua frequência inferior (Balanis, 2005) e também a possibilidade de se conseguir valores de diretividade consideravelmente altos. Entre outras vantagens, pode-se destacar o controle sobre a polarização da onda emitida e também a facilidade para ser construída, uma vez que são necessários poucos materiais para sua confecção. Possui como desvantagem a dificuldade de estabilização da estrutura da antena. Dependendo de suas dimensões, se faz necessário a construção de suportes ao longo do fio condutor da antena, a fim de que esta não venha a sofrer avarias devido às intempéries do tempo, por exemplo.

As antenas helicoidais podem operar no modo normal, onde o campo irradiado tem valores máximos em uma direção perpendicular ao eixo da hélice, sendo que ao longo deste, o campo é nulo, ou seja, opera de forma omnidirecional. Esse tipo de antena é muito utilizada em transceptores portáteis, como por exemplo, rádio comunicadores, onde a utilização de antenas helicoidais no modo normal se faz mais vantajosa, pois as dimensões desse tipo de antena são menores em relação a antenas monopolo convencionais. A Figura 1 ilustra um rádio portátil sem a capa de proteção, fazendo a utilização de uma antena helicoidal no modo normal.

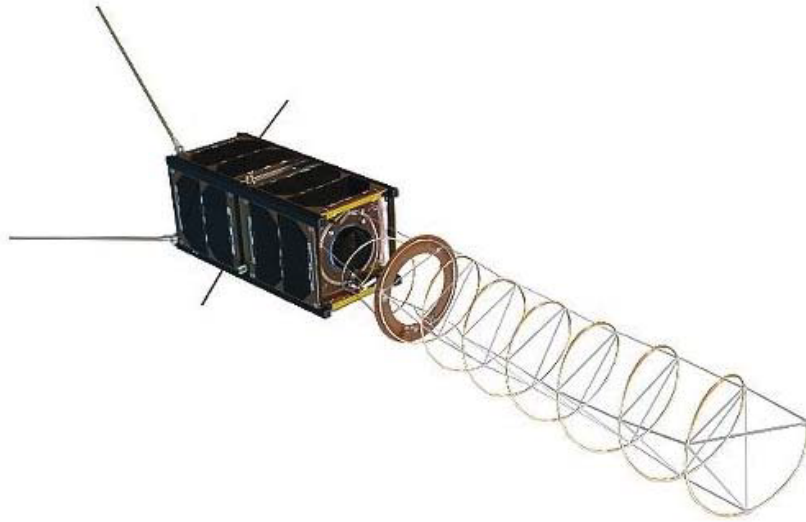
Figura 1 – Antena helicoidal utilizada em um rádio portátil.



Fonte: (TURNER, 2019).

As antenas helicoidais também podem operar no modo axial, onde a antena opera com um feixe direcional, orientado ao longo do eixo principal da hélice. Neste modo de operação, é muito comum sua utilização na faixa de frequências UHF, devido a seção reta da antena ser consideravelmente pequena (Stutzman; THIELE, 2012). Conta também com grandes aplicações em comunicações via satélite, sondas espaciais e mísseis. Sua alta diretividade se torna uma característica importante no contexto de uma comunicação via satélite ou de uma comunicação onde uma sonda se encontra fora da atmosfera. Nesses casos, como há uma grande distância entre os equipamentos de comunicação e também a influência na comunicação devido à diversos parâmetros das camadas da atmosfera, há a necessidade de uma antena com uma alta diretividade para manter bons patamares de conceitos, como por exemplo, a relação sinal ruído e então poder receber os sinais com qualidade. Sua capacidade de operação com ondas circularmente polarizadas também é de extrema importância nesses casos, pois pode receber um sinal polarizado com qualquer orientação. Essa é uma característica extremamente vantajosa, pois quando o sinal passa na ionosfera, por características próprias da ionização dessa camada, pode sofrer Rotação de Faraday, onde os vetores de campo tendem a se alterar em termos da polarização. Caso a antena transmissora e a antena receptora operassem com polarização linear, poderia haver perda de polarização (Stutzman; THIELE, 2012). Sendo assim, a operação com polarização circular evita esse tipo de perda e contribui facilitando esse tipo de comunicação. A Figura 2 ilustra um satélite da missão GATOSS, lançado em 21 de novembro de 2013, com uma antena helicoidal no modo axial sendo utilizada para retransmissão de sinais a fim de auxiliar no controle de tráfego aéreo.

Figura 2 – Nanosatélite GATOSS utilizando uma antena helicoidal.



Fonte: (KNUDSEN et al., 2014).

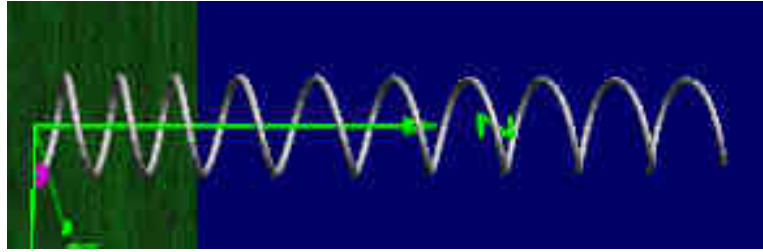
Muitos enlaces de comunicações móveis também operam com antenas direcionais e em diversas bandas como por exemplo na Banda X (8-12 GHz), onde as antenas helicoidais no modo axial teriam grandes aplicações devido as suas vantagens relacionadas à diretividade, operação em banda larga e operação com polarização circular.

Devido a sua ampla utilização e importância, se faz necessária a constante evolução no projetos dessas antenas, buscando parâmetros de operação e aspectos de projeto cada vez melhores nos quesitos relacionados à banda, diretividade, dimensões e peso.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo dos anos diversas aplicações tecnológicas com comunicação sem fio surgiram, e com elas, a necessidade de projetar ou aprimorar as antenas responsáveis por efetuar sua comunicação. Atualmente, há um crescente número de empresas e países interessados em realizar explorações espaciais, como o envio de satélites para a órbita terrestre, ou até mesmo sondas para fora do sistema solar. Muitas dessas aplicações fazem a utilização das antenas helicoidais, dada sua capacidade de operação com ondas circularmente polarizadas, operação em banda larga e fácil construção. Dados esses avanços, diversos tipos de aprimoramentos podem ser utilizados para se usufruir das principais vantagens das antenas helicoidais. Alguns aprimoramentos relacionados ao ângulo de passo da antena vem sendo estudados, bem como a operação desse tipo de antena na Banda X. Em (KUMAR; MENON, 2015), é realizado o estudo de uma antena helicoidal no modo axial com polarização circular e com ângulo de pitch não-uniforme, que é o ângulo formado entre um plano perpendicular ao eixo da hélice e uma reta tangente ao fio condutor da hélice. O modelo da antena elaborada é mostrado na Figura 3. Essa antena é comparada a outra antena construída com base no modelo convencional de Kraus.

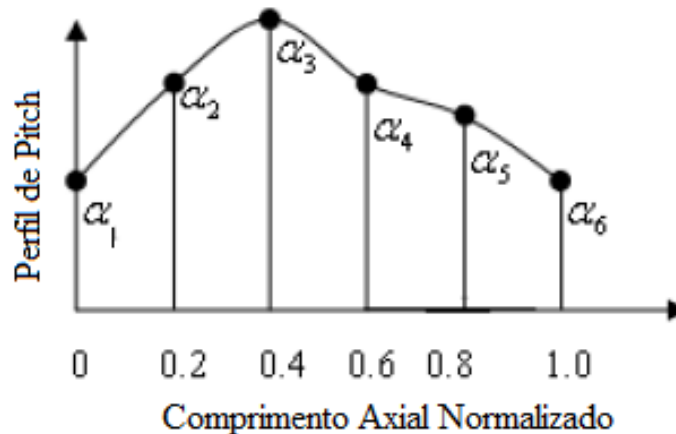
Figura 3 – Antena helicoidal com ângulo de pitch não-uniforme.



Fonte: (KUMAR; MENON, 2015).

Os ângulos de pitch são divididos em 6 valores, de α_1 até α_6 , interpolados por curva spline Catmull-Rom, que é um tipo de interpolação cúbica, com continuidade C^1 . A Figura 4 exemplifica a variação dos ângulos de pitch em 6 pontos equidistantes em função do comprimento axial normalizado da hélice.

Figura 4 – Perfil de pitch em função do comprimento axial normalizado da hélice.



Fonte: Adaptado de (KUMAR; MENON, 2015).

Foi utilizado o Numerical Electromagnetics Code 2 (NEC2) para determinar a impedância de entrada da hélice, a taxa de onda estacionária de tensão (VSWR), a razão axial (RA) e o ganho. A otimização foi realizada através do Particle Swarm Optimization (PSO). Também é apresentado o ganho em função do número de voltas da hélice, bem como o raio da hélice (a_λ) otimizado. A Tabela 1 demonstra os valores obtidos através da simulação, onde é possível observar o ganho otimizado, através da utilização dos 6 ângulos de pitch otimizados (α_n), bem como o raio da hélice otimizado (a_λ). É possível observar que com o aumento do número de espiras, há um aumento no ganho, bem como a predominância de uma impedância de entrada resistiva. Também é possível observar que esses valores de impedância possuem parte real relativamente alta, se comparada aos equipamentos que geralmente trabalham com impedância característica de 50Ω . Uma diminuição dessa impedância para prover um melhor casamento entre a linha de transmissão e a antena seria possível projetando-se adequadamente o primeiro $1/4$ do elo inicial da hélice (Balanis, 2005).

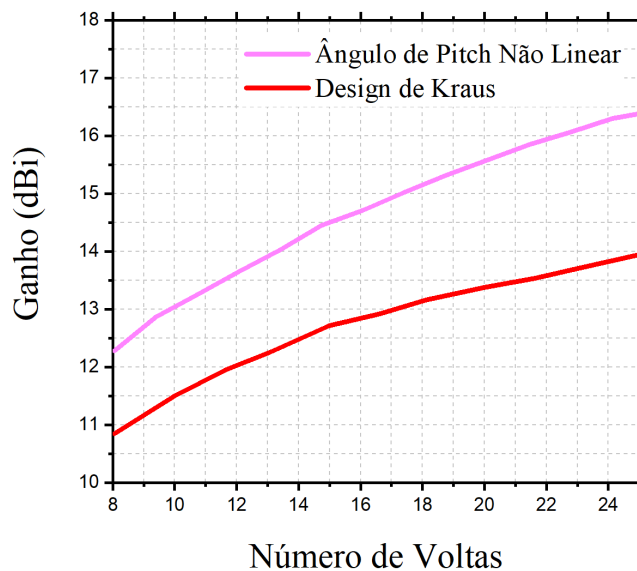
Tabela 1 – Resultados para diferentes parâmetros de operação.

N	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	a_λ	G(dB)	$Z_{in}(\Omega)$
8	10	10	15	14.76	15	14.21	0.2007	14.08	244.87-j46.56
10	10	10	15	14.74	15	15	0.1961	14.6	220.39-j19.24
15	10	10	13.72	14.65	13.78	13.08	0.1862	15.45	231.49-j11.76
20	10	10	15	15	15	14.57	0.1855	16.59	206.60-j9.69
25	10	10.87	15	15	15	15	0.1845	17.2	221.51-j8.47

Fonte: Adaptado de (KUMAR; MENON, 2015).

Na Figura 5 são comparados os valores de ganho obtidos através da antena proposta, que utiliza ângulo de pitch não-uniforme, com os valores obtidos de uma antena com design baseado no modelo convencional de Kraus, demonstrando um melhor desempenho do método proposto, que faz o uso de ângulo de pitch não-uniforme. Para determinar o ganho, foi utilizado um gerador de sinais Agilent N9310A na entrada da hélice com ângulo de pitch não-uniforme e da hélice convencional com base no design de Kraus. Um sensor de microondas HP8481A, em conjunto com uma antena dipolo de $\lambda/2$ foram utilizados para mensurar a potência recebida e desta forma, poder determinar o ganho. Observa-se também, que o ganho na prática é menor que o valor simulado, devido à perdas no processo de irradiação e reflexões nas conexões.

Figura 5 – Comparação entre os métodos construtivos.

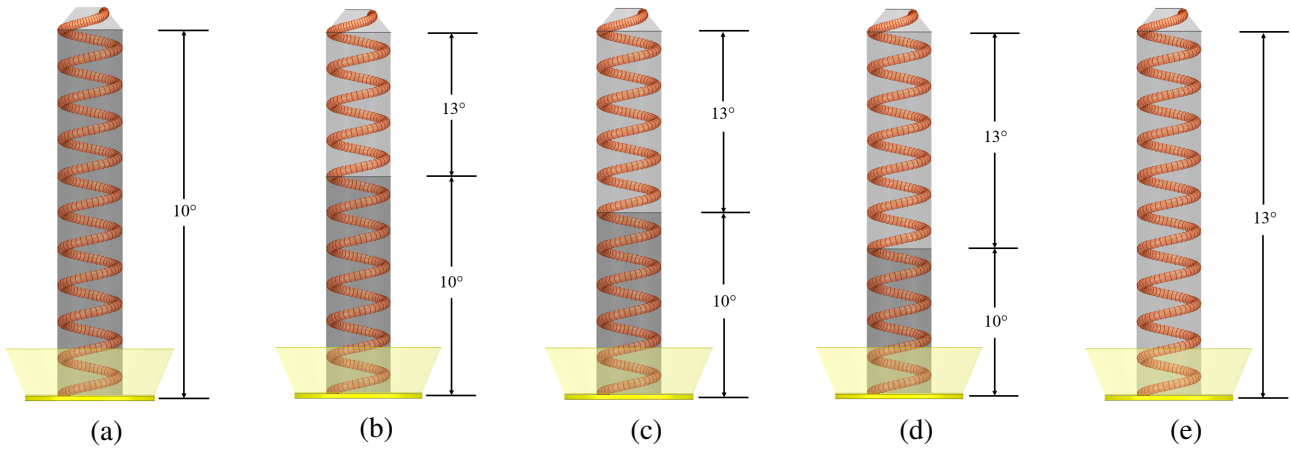


Fonte: Adaptado de (KUMAR; MENON, 2015).

Em (SULTAN et al., 1984), um dos primeiros artigos acerca de antenas helicoidais com ângulo de pitch não-uniforme, foi realizado um estudo com 5 tipos de antenas, todas com uma seção final da hélice otimizada. Foram comparados dois tipos de hélices, com ângulo de pitch constante, sendo a antena A com 10° e a antena E com 13° , e três tipos de hélices, sendo elas a B, C e D, com ângulos de passo de 10° e 13° na mesma hélice e em diferentes proporções, conforme ilustrado na Figura 6.

Partindo do pressuposto de que as aplicações espaciais requerem dispositivos com menor peso e dimensões, esse estudo tinha como objetivo principal conseguir uma melhora no ganho e um aumento na banda de operação em relação às antenas helicoidais comuns.

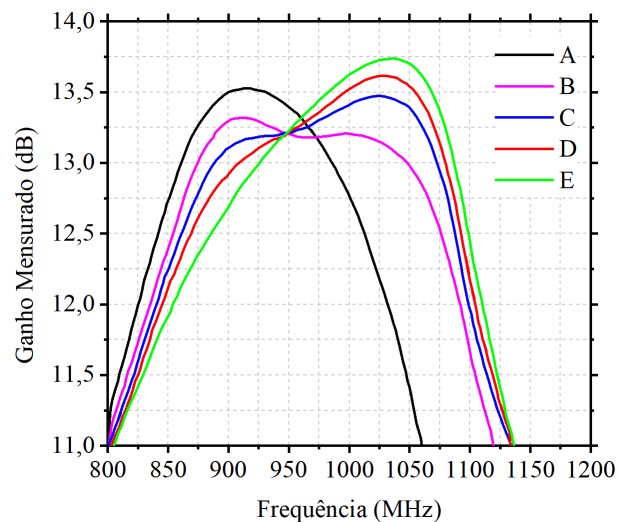
Figura 6 – Antenas com diferentes ângulos de pitch.



Fonte: Adaptado de (SULTAN et al., 1984).

Através das análises, demonstrou-se que é possível combinar a frequência de operação de uma hélice com um ângulo de passo menor, com a frequência de operação de uma hélice com um ângulo de passo maior em uma mesma hélice, a fim de formar uma antena helicoidal com maior banda de operação, conforme ilustrado na Figura 7. A proporção dos ângulos de pitch utilizados pode ser modificada a depender do resultado desejado.

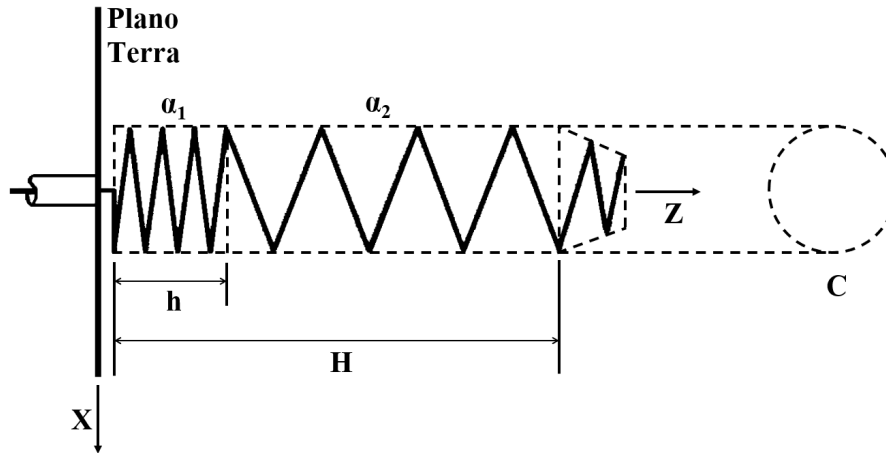
Figura 7 – Comparação entre diferentes proporções de ângulos de pitch.



Fonte: Adaptado de (SULTAN et al., 1984).

Com base nos resultados obtidos em (SULTAN et al., 1984), em (MIMAKI; NAKANO, 1998) foi analisada a relação entre os dois ângulos de passo de uma hélice em função do ganho e também em função da banda de operação. A Figura 8 ilustra a relação entre os ângulos h e H .

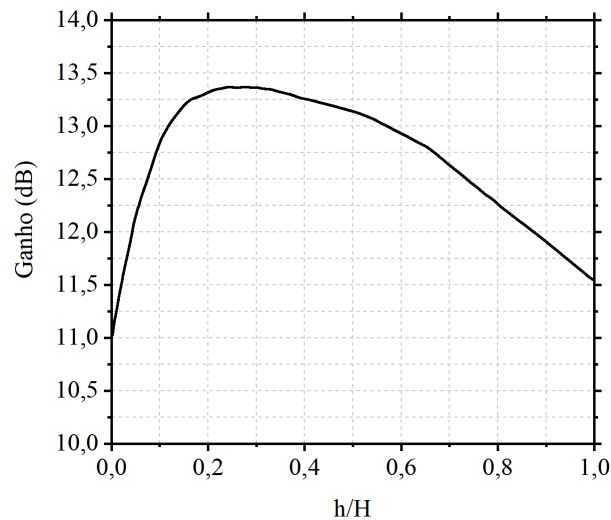
Figura 8 – Antena com dois ângulos de pitch.



Fonte: Adaptado de (MIMAKI; NAKANO, 1998).

Foi escolhido um ângulo α_1 de 2° , com uma altura h e um ângulo α_2 de 12.5° com uma altura H . Observou-se que o ganho é maximizado quando a relação $h/H = 0.263$, conforme a Figura 9.

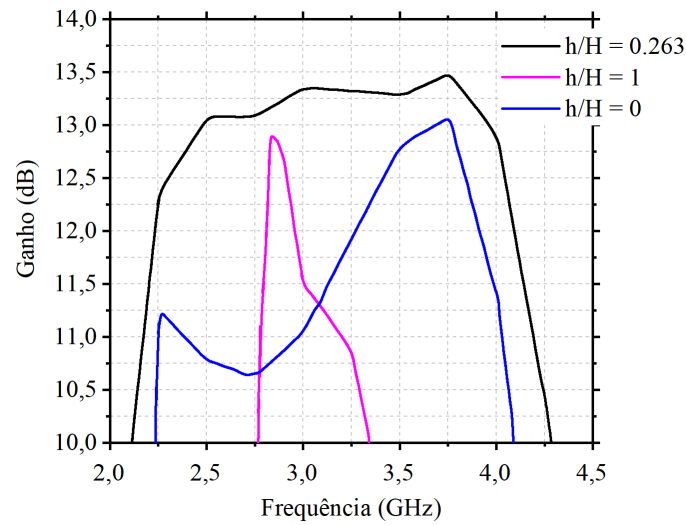
Figura 9 – Ganho em função das proporções dos ângulos de pitch.



Fonte: Adaptado de (MIMAKI; NAKANO, 1998).

Também observou-se que o ganho se mantém em valores maiores em uma faixa de frequência mais ampla, quando comparado ao ganho de uma hélice com apenas um ângulo de passo ($h/H = 0$) e com uma hélice com α_1 e α_2 iguais ($h/H = 1$), conforme a Figura 10.

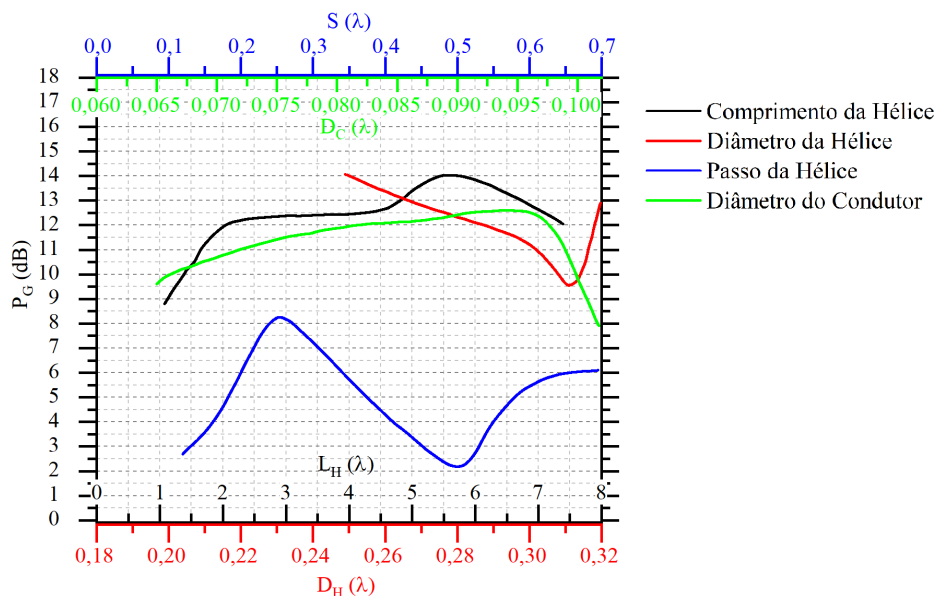
Figura 10 – Ganho em função da frequência para diferentes proporções de ângulos de pitch.



Fonte: Adaptado de (MIMAKI; NAKANO, 1998).

Em (JAMWAL K K S VAKIL, 1986), é realizado um dos primeiros estudos de uma antena helicoidal operando na banda X. A análise foi realizada com base em uma antena operando na frequência de 11,0 GHz. A Figura 11 ilustra o Ganho de Potência (P_G) em função dos principais parâmetros constitutivos da antena, como o comprimento da hélice (L_H), o diâmetro da hélice (D_H), o passo da hélice (S), que é o espaçamento entre os elos e o diâmetro do condutor (D_C).

Figura 11 – Influência dos parâmetros construtivos no ganho da antena.



Fonte: Adaptado de (JAMWAL K K S VAKIL, 1986).

É possível observar um aumento do ganho de potência ao se aumentar o comprimento da hélice, obtendo-se um valor ótimo quando o comprimento da hélice atinge aproximadamente $5,5\lambda$. Também há uma melhora no ganho de potência com o aumento do diâmetro do condutor, onde o melhor resultado é obtido quando este atinge $0,088\lambda$. Já ao se aumentar o diâmetro da hélice, ou o passo da hélice, o ganho de potência tende a assumir valores mais baixos.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo do projeto de antenas helicoidais convencionais no modo axial e também no modo normal. Para entender melhor o funcionamento dessas antenas, nos dois modos de operação, serão estudadas as características de projeto, a fim de verificar o comportamento da antena em função de vários parâmetros, como por exemplo, o número de voltas, o raio da hélice, o espaçamento entre as voltas da hélice e o tamanho do plano terra. De modo geral, serão estudados quais são os parâmetros que influenciam no comportamento da antena.

Posteriormente, como objetivo mais específico, realizar o estudo do funcionamento de antenas helicoidais com ângulo de pitch não-uniforme operando na banda X. Verificar a influência da não-uniformidade do ângulo de pitch no desempenho e comportamento da antena. Verificar os valores ótimos dos parâmetros construtivos, para que se obtenha o melhor comportamento possível.

Utilizar o software Ansys HFSS para modelar e otimização computacional dos modelos de antenas helicoidais. Verificação do comportamento das antenas através do seu diagrama de irradiação, e parâmetros como por exemplo, diretividade, banda de operação e perda de retorno.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1, foi abordada a motivação do trabalho, os objetivos e foi realizada uma revisão da literatura, abordando os principais trabalhos já realizados acerca de antenas helicoidais com ângulo de pitch não-uniforme e também antenas helicoidais com operação na banda X.

No capítulo 2, será feito um estudo dos parâmetros fundamentais e construtivos das antenas helicoidais, bem como o desenvolvimento de exemplos, construção e simulação de antenas helicoidais no modo axial e no modo normal, no software Ansys HFSS.

No capítulo 3, será realizado um estudo sobre antenas helicoidais com ângulo de pitch não-uniforme operando na banda X, bem como a construção e simulação no software Ansys HFSS.

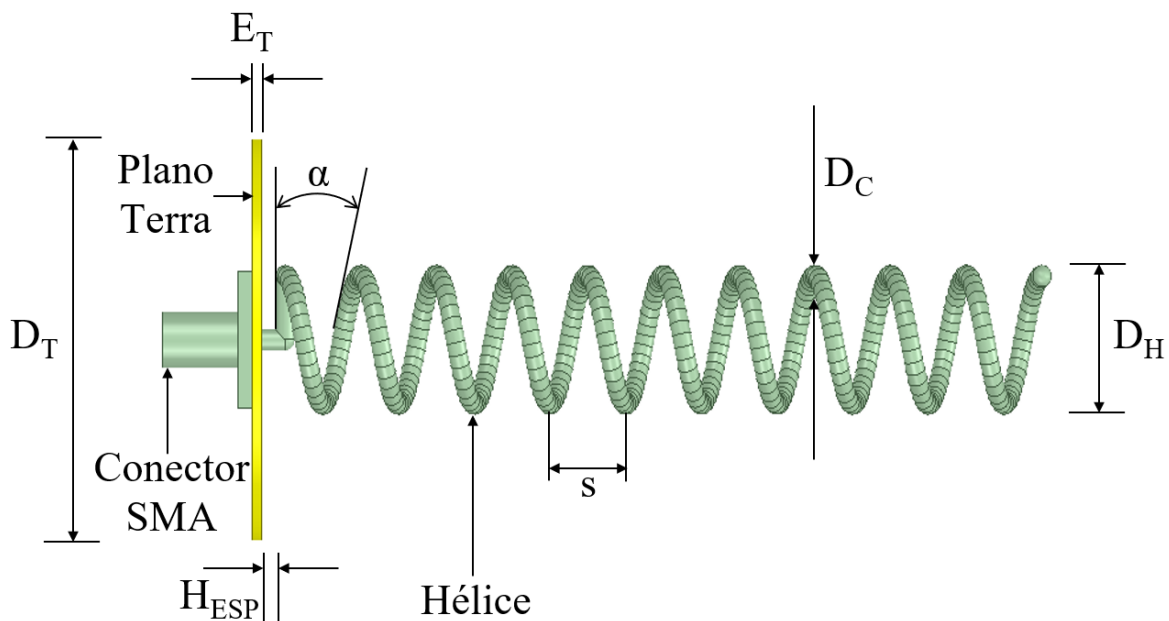
No capítulo 4, será feita a conclusão do trabalho com base no estudo das antenas helicoidais e nos resultados obtidos.

2 DESIGN DE ANTENAS HELICOIDAIS

As antenas helicoidais são elementos irradiadores constituídos por um fio condutor rígido, cujo raio de curvatura se mantém constante ao longo de toda estrutura, constituindo uma hélice. Sua base é composta por um plano terra. A Figura 12 demonstra uma antena helicoidal, com plano terra circular, bem como seus parâmetros construtivos, que serão explicados posteriormente.

Uma das vantagens das antenas helicoidais, é sua capacidade de operação com ondas circularmente polarizadas. Através da emissão de ondas com polarização circular, é possível que uma antena com polarização linear, posicionada em qualquer direção perpendicular a direção de propagação, consiga fazer a recepção do sinal. Ainda que nesse caso haja perda de potência, não haverá oscilações do nível de sinal em decorrência da polarização da onda incidente. Essas antenas também são capazes e captar ondas com polarização linear com qualquer orientação, que estejam na direção de propagação. Para isso, é necessário que os critérios de projetos satisfaçam as condições necessárias para que haja a polarização circular.

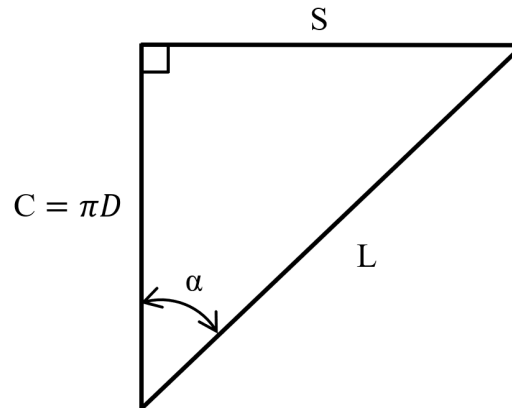
Figura 12 – Parâmetros construtivos de uma antena helicoidal.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 13 revela as relações geométricas entre os parâmetros de construção da hélice. Um cateto se caracteriza como o passo da hélice (S), e o outro, como a circunferência da hélice (C). Com isso é possível calcular o parâmetro L , que representa o comprimento de uma volta da hélice. Esses parâmetros também são relacionados através do ângulo de pitch (α).

Figura 13 – Comprimento de uma espira.



Fonte: Próprio Autor.

2.1 PARÂMETROS CONSTRUTIVOS

A fim de se projetar uma antena helicoidal, é importante definir os parâmetros construtivos que compõem a antena, conforme descritos abaixo.

2.1.1 Plano Terra

O plano terra pode assumir diferentes formatos. Entre eles, destacam-se alguns mais comuns, como os planos terra em formato circular, retangular ou cônico (similar aos das antenas da Figura 6). Se a onda existente na hélice for puramente viajante, este é um parâmetro que gera pouca influência no projeto de uma antena helicoidal e não exige formatos e disposições especiais. Entretanto, na prática há a existência de outros modos, e também pode haver a existência de uma onda refletida na extremidade da antena, a qual pode retornar para a região de alimentação. Neste caso, a disposição do plano terra se torna um fator importante (Stutzman; THIELE, 2012). Para um plano terra no formato retangular, este pode assumir lados com tamanhos variando entre $0,5\lambda_0$ e λ_0 . Para um plano terra no formato circular, o diâmetro D_T também assume valores nesse intervalo (RIBEIRO, 2012).

2.1.2 Diâmetro do Condutor da Hélice

Outro aspecto construtivo a ser considerado em um projeto de uma antena helicoidal, é o diâmetro do condutor da hélice D_C . Uma alteração deste parâmetro não modifica significativamente as características de operação da antena, sendo sua influência mais observável quando é analisada a perda de potência. Apesar de a influência deste parâmetro nas características da antena ser praticamente desprezível, o diâmetro do fio condutor deve ser selecionado criteriosamente para cada projeto. Seu diâmetro não deve ser muito grande, pois isso acarretaria em uma antena com um peso desnecessário, além de um gasto excedente com materiais de produção. Porém, seu diâmetro também não deve ser muito pequeno, pois a estrutura da antena requer rigidez mecânica e estabilidade.

2.1.3 Diâmetro da Hélice

O diâmetro da hélice D_H constitui um dos parâmetros mais importantes a ser considerado no projeto de uma antena helicoidal. Dependendo do diâmetro da hélice, é possível definir se a antena irá operar no modo normal, ou no modo axial. O diâmetro da hélice também é determinante para definir a frequência de operação. Os modos de operação e seus requisitos serão discutidos posteriormente. Também é possível observar que quando o valor do diâmetro da hélice é igual a zero, a antena tende a se tornar um filamento.

2.1.4 Circunferência da Hélice

A Circunferência da Hélice (C) pode ser calculada através do diâmetro da hélice, conforme a equação a seguir:

$$C = \pi D_H \quad (2.1)$$

2.1.5 Ângulo de Pitch

É o ângulo α formado entre um plano perpendicular ao eixo da hélice e uma reta tangente ao fio condutor da hélice. Também pode ser definido pela equação a seguir:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{S}{C} \right) \quad (2.2)$$

Usualmente, os valores de ângulos de pitch entre 11° e 14° são os mais utilizados, sendo 13° o ângulo de passo mais comum. Isso se deve ao fato de que, com este valor de ângulo de pitch, a antena pode ser considerada uma antena de banda larga (KRAUS; MARHEFKA, 2002).

2.1.6 Passo da Hélice

O passo da hélice (S) é um parâmetro determinante no projeto de antenas helicoidais e também está atrelado ao ângulo de pitch (α) da hélice. Se o passo da hélice for igual a zero, a antena pode ser considerada uma Antena Quadro, uma vez que o espaçamento entre as espiras adjacentes é nulo. Pode ser determinado por:

$$S = C \tan \alpha \quad (2.3)$$

2.1.7 Comprimento de Uma Volta

Através da circunferência da hélice e também do passo da hélice, é possível determinar o comprimento (L) de uma volta da hélice, assim como exemplificado na Figura 13. Através do cálculo da hipotenusa, tem-se que:

$$L = \sqrt{C^2 + S^2} \quad (2.4)$$

2.1.8 Comprimento Total do Condutor da Hélice

Sabendo-se do comprimento de uma volta da hélice, e também do número de voltas N utilizado, é possível calcular o comprimento total do condutor da hélice L_C a partir de:

$$L_C = NL \quad (2.5)$$

2.1.9 Distância Entre a Hélice e o Plano Terra

A distância entre a hélice e o plano terra é um parâmetro determinante para prover um melhor casamento de impedância entre a hélice e a linha coaxial. Para um melhor casamento de impedância, o início da hélice deve-se localizar o mais próximo possível do plano terra. Conforme mencionado anteriormente, uma diminuição dessa impedância para prover um melhor casamento entre a linha de transmissão e a antena é possível projetando-se adequadamente o primeiro 1/4 do elo inicial da hélice (Balanis, 2005). No exemplo de uma antena helicoidal operando no modo axial, que será apresentado posteriormente, é realizada uma análise da influência da distância entre a hélice e o plano terra na diretividade e banda da antena.

2.1.10 Número de Voltas

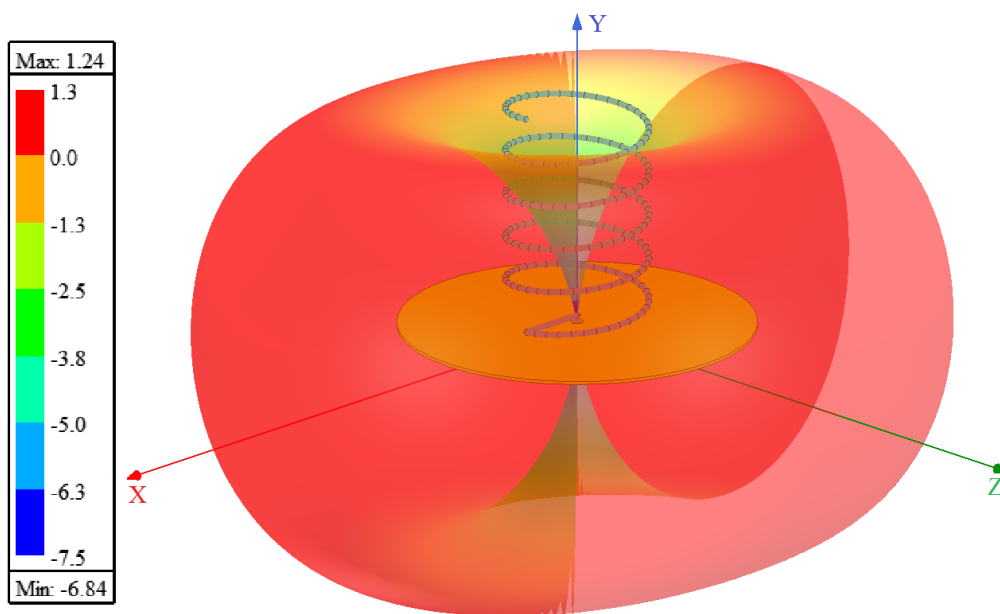
No modo axial, o número de voltas (N) de uma hélice, é o fator que exerce maior controle sobre a diretividade. É possível aumentar a diretividade aumentando-se o número de voltas. Porém, em termos práticos, uma hélice com uma grande quantidade de elos pode ser inviável devido ao peso da estrutura. Além disso, como será visto posteriormente no exemplo de uma antena operando no modo axial, há um limite para o aumento da diretividade ao se aumentar o número de voltas de hélice. Isso ocorre, pois, as antenas helicoidais no modo axial se comportam como antenas de ondas viajantes, servindo como guiamento para ondas viajantes. Cada elo possui circunferência equivalente a um comprimento de onda, e a cada elo da hélice, a onda vai perdendo intensidade, de forma que um aumento no número de voltas, não resulta em um aumento no desempenho da hélice, dependendo do número de voltas utilizado. Devido à essa característica de perda de intensidade ao longo dos elos, também pode haver pouca reflexão ao final da hélice, pois a maioria da potência já foi irradiada ou dissipada ao longo do condutor (Stutzman; THIELE, 2012).

2.2 DESIGN PARA O MODO NORMAL

As antenas helicoidais, de forma geral, podem operar no modo normal e no modo axial. A operação das antenas helicoidais no modo normal, ou transversal, se dá quando as dimensões da hélice são muito menores que o comprimento de onda. Pode-se considerar que a operação neste modo se dá quando $L_C \leq \lambda_0/4$. Neste caso, a antena opera com uma polarização majoritariamente vertical (Stutzman; THIELE, 2012). É possível se alcançar a polarização circular para este modo de operação, conforme será visto no exemplo a seguir, onde a circunferência da hélice é equivalente a $0,2\lambda_0$. Porém, as dimensões utilizadas para se alcançar a polarização circular não levam a ressonância da antena, devido

a alta reatância. Para que haja a ressonância, é necessário a utilização de um elemento externo de forma a compensar essa reatância (RIBEIRO, 2012). Este modo de operação leva este nome devido ao fato de que, o campo irradiado tem valores máximos em uma direção perpendicular ao eixo longitudinal da hélice, sendo que ao longo deste, o campo é nulo. A Figura 14 ilustra o diagrama de irradiação de diretividade (em dB) de uma antena helicoidal operando no modo normal. Este diagrama é referente à antena apresentada no exemplo a seguir, a qual é ilustrada na Figura 16. É possível observar a ocorrência dos valores máximos na direção perpendicular ao eixo principal da hélice, caracterizando essa antena como uma antena omnidirecional.

Figura 14 – Diagrama de irradiação de diretividade de uma antena helicoidal operando no modo normal.

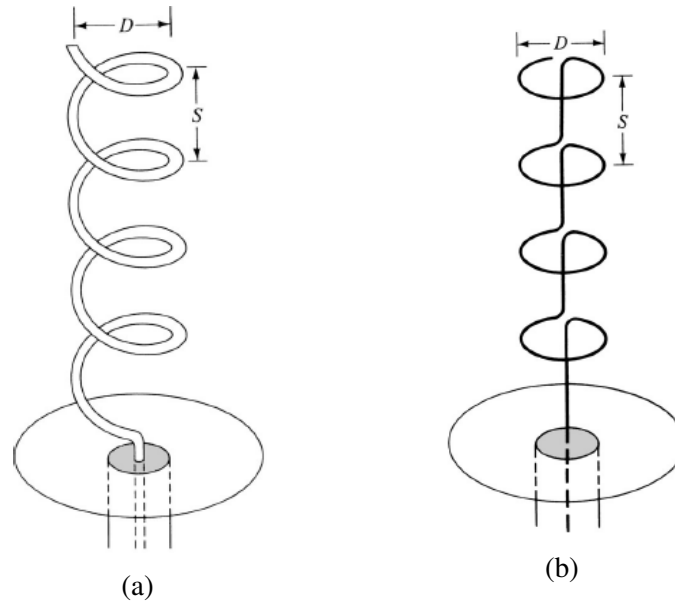


Fonte: Próprio Autor.

Neste modo de operação, as antenas helicoidais são eletricamente pequenas. Por isso, possuem baixa eficiência e uma largura de banda estreita, levando a uma limitação na sua gama de aplicações, sendo pouco utilizada (Balanis, 2005).

Como as dimensões da antena são pequenas, pode-se assumir que a corrente ao longo da antena possui amplitude e fase constantes. Sendo assim, o campo irradiado é independente do número de espiras. Desta forma, a antena helicoidal pode ser simplificada. Suas espiras podem ser aproximadas por quadros de pequeno diâmetro e o passo da hélice, por dipolos curtos. A composição dos quadros e dipolos curtos representa a antena helicoidal no modo normal. A Figura 15 demonstra uma antena helicoidal e sua equivalente, composta por dipolos curtos e quadros de pequeno diâmetro.

Figura 15 – Antena helicoidal (a) e antena equivalente (b).



Fonte: (Balanis, 2005).

Devido a essa equivalente, composta por dois tipos de irradiadores, é possível analisar o campo irradiado em termos do campo irradiado pelo dipolo juntamente com o campo irradiado pelo quadro. A equação a seguir demonstra o campo elétrico irradiado por um dipolo curto (Balanis, 2005):

$$E_{\theta} = \frac{j\eta k I_0 S e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \quad (2.6)$$

O campo elétrico irradiado por um quadro de pequeno diâmetro é descrito pela Equação 2.7 (Balanis, 2005).

$$E_{\phi} = \frac{\eta k^2 (D_H/2)^2 I_0 e^{-jkr}}{4r} \sin\theta \quad (2.7)$$

Onde:

η é a impedância intrínseca do meio;

k é o número de onda;

D_H é o diâmetro da hélice;

I_0 é o valor máximo da corrente elétrica;

S é o passo da hélice;

r é a distância até o ponto de cálculo.

Devido a presença do fator j , os campos estão em quadratura de fase, ou seja, possuem uma defasagem de 90° , sendo esta, uma das condições necessárias para que haja a polarização circular.

Através das equações 2.6 e 2.7, é possível definir a razão axial (RA). Quando $RA = 1$, isso indica que a magnitude dos campos E_ϕ e E_θ são iguais, o que leva a uma polarização circular. Quando $E_\theta = 0$, a onda assume uma polarização linear horizontal (antena quadro). Já quando $E_\phi = 0$, a onda assume uma polarização linear vertical (antena dipolo).

$$RA = \frac{E_\theta}{E_\phi} = \frac{s/\pi}{k(D_H/2)^2} = \frac{4S}{k\pi D_H^2} \quad (2.8)$$

Como mencionado, para que a onda seja circularmente polarizada, a Razão Axial deve assumir um valor unitário. Para isso, a condição a seguir deve ser satisfeita:

$$\frac{4S}{k\pi D_H^2} = 1 \quad (2.9)$$

Logo,

$$\frac{2\lambda_0 S}{(\pi D_H)^2} = 1 \quad (2.10)$$

$$C = \pi D_H = \sqrt{2\lambda_0 S} \quad (2.11)$$

Outros casos particulares se dão quando S ou D são iguais a zero. Quando o espaçamento entre as espiras $S = 0$, o ângulo de pitch se torna igual a 0° e a antena se reduz a uma antena quadro. Neste caso, $E_\theta = 0$, o que leva a uma $RA = 0$. Já quando o diâmetro das espiras assume o valor $D = 0$, o ângulo de passo se torna igual a 90° . Neste caso, $E_\phi = 0$ o que leva a uma $RA \rightarrow \infty$.

2.2.1 Exemplo de Projeto de Uma Antena no Modo Normal

A fim de exemplificar a operação de uma antena helicoidal no modo normal, com frequência de operação de 400 MHz, uma hélice de 5 espiras, foi projetada através do software Ansys HFSS, onde foi feita sua construção, análise e simulação. A estrutura projetada é apresentada na Figura 16. O passo da hélice considerado é de $S = \lambda_0/50$, ou seja, muito menor que o comprimento de onda, sendo este um requisito para a operação no modo normal.

Para calcular os parâmetros construtivos da antena, primeiramente deve-se saber o comprimento de onda na frequência central de operação, o qual é calculado por:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.12)$$

Onde c representa a velocidade da luz, dada em m/s e f representa a frequência central de operação.

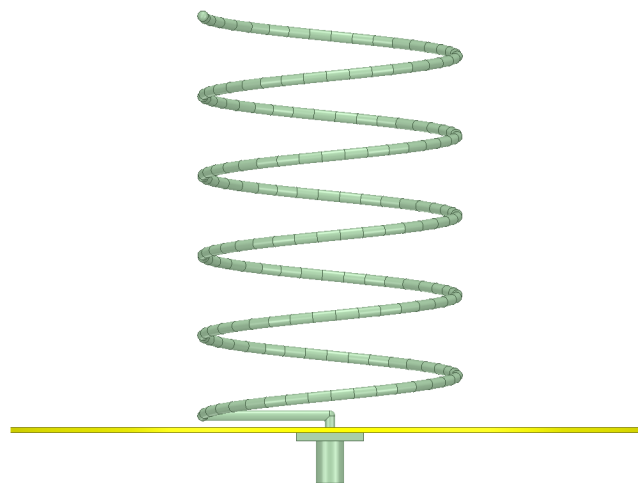
Através de 2.12, obtém-se que o comprimento de onda λ_0 é igual a 750mm. Com isso, para a operação da antena na frequência desejada, a circunferência C da hélice é calculada com base na equação 2.11:

$$C = \pi D_H = \sqrt{2\lambda_0 S} = \sqrt{2\lambda_0 \left(\frac{\lambda_0}{50}\right)}$$

Isso resulta em uma circunferência da hélice $C = 0,2\lambda_0$. Com isso, é possível obter que o diâmetro da hélice é $D_H = 47.75mm$. O ângulo de passo utilizado é calculado através da equação 2.2, resultando em $\alpha = 5.71^\circ$. A espessura E_T do plano terra foi adotada como sendo igual a 1mm, e seu diâmetro D_T , como sendo igual a 120mm. Foi considerado um diâmetro D_C do condutor igual a 1mm. Para uma otimização na perda de retorno S_{11} da antena, foi escolhido um espaçamento H_{ESP} entre a primeira volta da hélice e o plano terra igual 1.5mm. Sabendo-se do passo e da circunferência da hélice, é possível calcular o comprimento de uma volta. Através da equação 2.4, obtém-se que $L = 150.74mm$. Uma vez que o número de voltas adotado foi igual a 5, o comprimento total do condutor da hélice, calculado através da equação 2.5 é de $L_C = 1507.48mm$.

A fim de fornecer a alimentação para antena, foi utilizado um conector SMA fêmea reto de base quadrada, com impedância de 50 Ω . A construção desse conector foi baseada no projeto do conector da marca KLC Conectores, de código 3003. Na prática, para prover a alimentação da antena, um cabo coaxial é conectado ao conector SMA, sendo que o condutor interno do cabo coaxial é responsável por prover a alimentação da antena. Já o condutor externo do cabo coaxial, é interligado ao plano terra através da parte externa do conector, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Exemplo de antena helicoidal operando no modo normal.



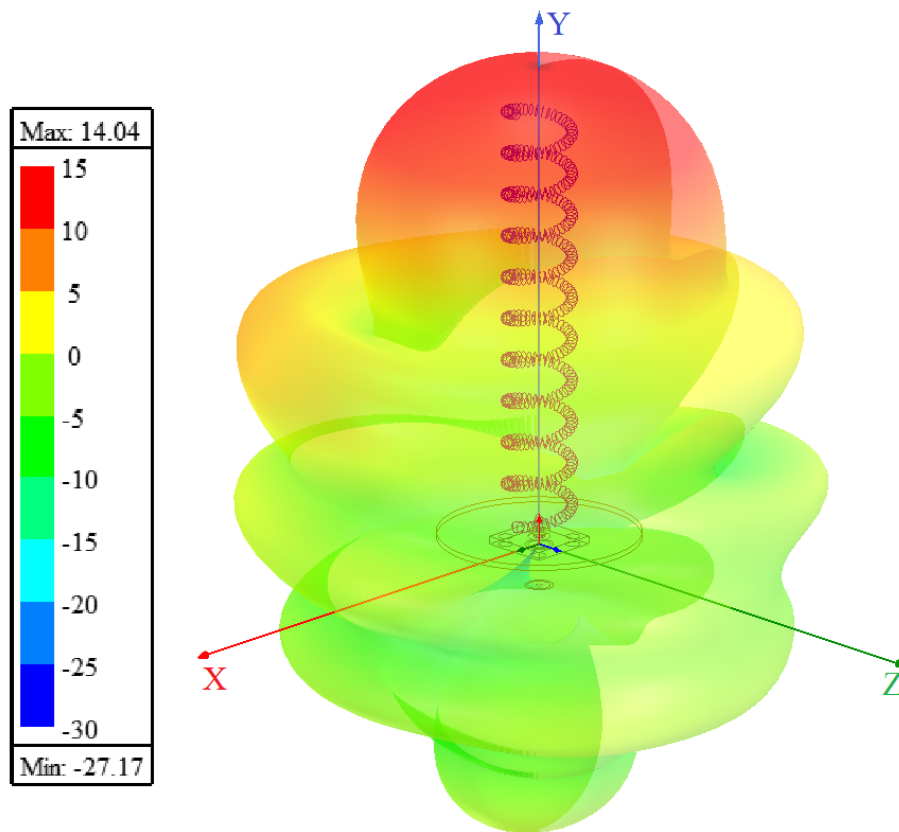
Fonte: Próprio Autor.

Como citado anteriormente, o diagrama de irradiação da diretividade para este exemplo é demonstrado na Figura 14, onde verifica-se sua operação de forma omnidirecional.

2.3 DESIGN PARA O MODO AXIAL

A operação das antenas helicoidais no modo axial, modo de feixe ou *end-fire*, se dá quando a circunferência da hélice possui valor equivalente ao comprimento de onda de operação. Neste modo, a antena opera com um feixe direcional, orientado ao longo do eixo principal da hélice. A Figura 17 ilustra o diagrama de irradiação de diretividade (em dB) de uma antena helicoidal operando no modo axial, referente ao exemplo a seguir, no qual a antena é ilustrada na Figura 21. É possível observar a ocorrência dos valores máximos de campo quando $\phi = 0$, ou seja, ao longo do eixo principal da hélice. Este modo de operação, que é o mais amplamente utilizado, é útil para se projetar antenas com melhores valores em termos do ganho, além de uma maior eficiência se comparado ao modo normal.

Figura 17 – Diagrama de irradiação de diretividade de uma antena helicoidal operando no modo axial.



Fonte: Próprio Autor.

Um melhor desempenho de antenas helicoidais com uma pequena quantidade de espiras é alcançado em uma faixa de frequências correspondente a equação 2.13, o que resulta em uma largura de banda fracionária de 1.78, conforme a equação 2.14 (Stutzman; THIELE, 2012).

$$\frac{3}{4}\lambda_0 \leq C \leq \frac{4}{3}\lambda_0 \quad (2.13)$$

$$B_f = \frac{f_s}{f_i} = \frac{c\lambda_s}{c\lambda_i} = \frac{4/3}{3/4} = 1.78 \quad (2.14)$$

Onde:

B_f é a largura de banda fracionária;

f_s é a frequência superior de operação;

f_i é a frequência inferior de operação;

λ_s é o comprimento de onda relacionado a frequência superior de operação;

λ_i é o comprimento de onda relacionado a frequência inferior de operação.

Essa pode ser considerada uma largura de banda aceitável para antenas de tamanho intermediário, que podem sofrer variações no diagrama de irradiação e na impedância de entrada (Balanis, 2005). Além disso, esse valor se aproxima da largura de banda 2:1, a qual é utilizada para caracterizar antenas de banda larga.

Diferentemente da fase das antenas helicoidais que operam no modo normal, que é considerada constante ao longo da antena, as antenas helicoidais que operam no modo axial, tem como característica uma fase que varia ao longo da antena. Devido à circunferência da hélice ser da ordem do comprimento de onda, é possível assumir que a corrente em pontos opostos de uma espira possui uma defasagem de 180° . Essas variações de fase caracterizam as antenas helicoidais como antenas de ondas viajantes, ou antenas não-ressonantes, uma vez que a fase da corrente varia ao longo da hélice.

Sabendo-se que r é o raio da espira, a corrente pode ser descrita pela equação a seguir:

$$I = I_0 e^{-ikr\phi} \quad (2.15)$$

No domínio do tempo:

$$i(\phi, t) = I_0 \cos(\omega t - kr\phi) \quad (2.16)$$

Sendo:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2.17)$$

Logo, tem-se que em $t = 0$,

$$i(\phi, 0) = I_0 \cos(kr\phi) \quad (2.18)$$

Em $t = \frac{T}{4}$,

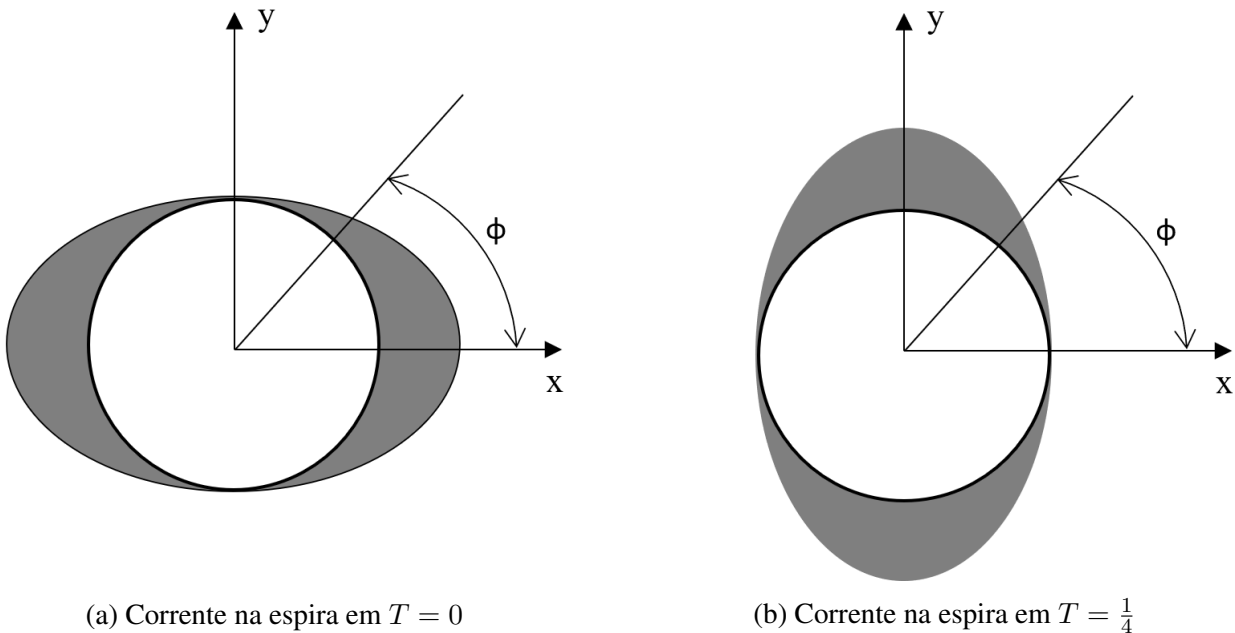
$$i\left(\phi, \frac{1}{4}\right) = I_0 \cos\left(\frac{2\pi T}{T} \frac{1}{4} - kr\phi\right) = I_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} - kr\phi\right) \quad (2.19)$$

Em $t = \frac{T}{2}$,

$$i\left(\phi, \frac{1}{2}\right) = I_0 \cos\left(\frac{2\pi T}{T} \frac{T}{2} - kr\phi\right) = I_0 \cos(\pi - kr\phi) \quad (2.20)$$

A Figura 18 ilustra a corrente ao longo da espira em $t = 0$ e $t = \frac{T}{4}$.

Figura 18 – Distribuições de corrente ao longo da espira



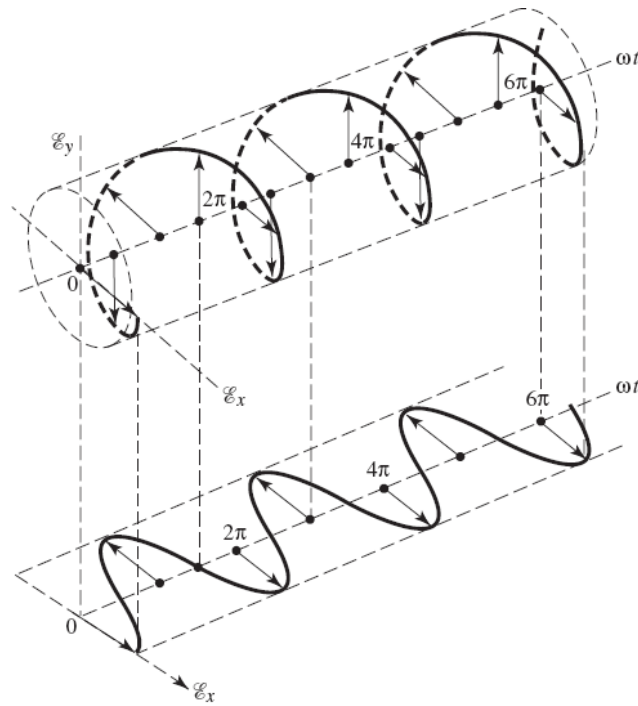
Fonte: Adaptado de (RIBEIRO, 2012).

Para que uma onda possua polarização circular, ela deve satisfazer algumas condições. O campo deve possuir duas componentes lineares e ortogonais, de mesma magnitude. Além disso, Devem possuir uma defasagem que seja múltipla ímpar de 90° (Balanis, 2005). Logo, com base na figura Figura 18, é possível observar que o campo possui duas componentes lineares ortogonais, com mesma magnitude e com uma diferença temporal de 90° .

Sendo assim, é característica de antenas helicoidais operando no modo axial, a emissão de ondas com polarização circular ao longo do eixo principal da hélice. Além do fato de as características de uma antena helicoidal conferirem à onda polarização circular, é necessário definir o sentido da polarização.

A Figura 19, ilustra um campo elétrico instantâneo com a rotação no sentido horário, se afastando do “observador” a qual é designada polarização à direita.

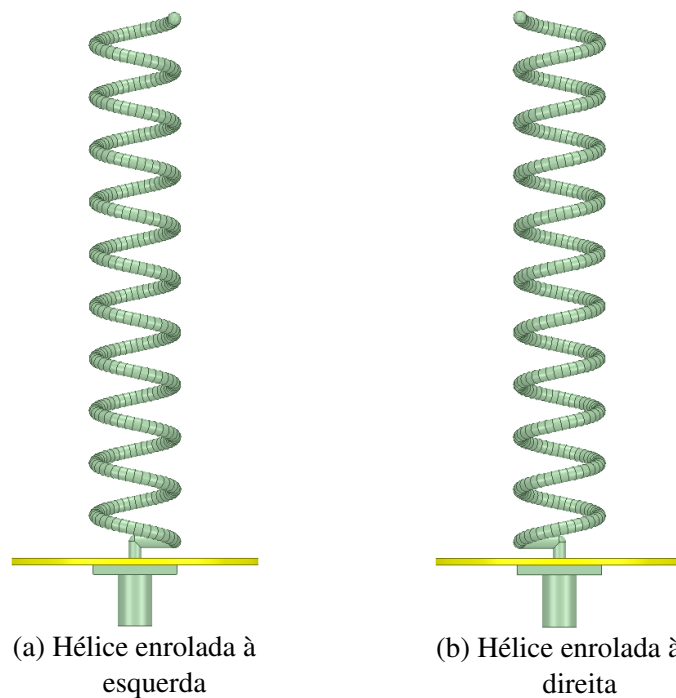
Figura 19 – Rotação da onda.



Fonte: (Balanis, 2005).

Com base no exemplo da Figura 19, é possível fazer uma analogia com as antenas helicoidais. A Figura 20, ilustra dois tipos de hélices. Em (a), tem-se uma hélice enrolada à esquerda. Em (b), tem-se uma hélice enrolada à direita. Sendo assim, é possível estabelecer o sentido de polarização da onda, com base no sentido do enrolamento da espira.

Figura 20 – Hélices enroladas à esquerda e à direita.



Fonte: Próprio autor.

Desta forma, como em (a), tem-se uma hélice enrolada à esquerda, ou seja, no sentido anti-horário, logo a onda emitida por esta hélice terá uma polarização circular à esquerda. Já em (b), tem-se uma hélice enrolada à direita, ou seja, no sentido horário, logo, a onda emitida por esta hélice terá uma polarização circular à direita.

A partir definições empíricas, obtidas através de sucessivos experimentos, foi possível estabelecer diversos parâmetros das antenas helicoidais. Esses parâmetros só são válidos se as condições $12^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$, $\frac{3}{4}\lambda_0 \leq C \leq \frac{4}{3}\lambda_0$ e $N > 4$ forem satisfeitas (KRAUS; MARHEFKA, 2002).

A fim de minimizar as reflexões na junção da linha coaxial com a entrada da antena, é importante definir a resistência de entrada da antena, de modo que haja um casamento de impedância. Assumindo que a hélice não seja afetada por outros fatores, e que seja dotada de um comportamento com ondas puramente viajantes, é possível considerar que a resistência de entrada seja puramente resistiva, dada por:

$$R = 140 \left(\frac{C}{\lambda_0} \right) \quad (2.21)$$

Essa definição considera um erro de $\pm 20\%$ (KRAUS; MARHEFKA, 2002).

A Largura de Feixe de Meia potência (LFMP), ou apenas Largura de Feixe, é um parâmetro utilizado na análise do diagrama de irradiação da antena. Este pode ser definido como o ângulo que separa dois pontos iguais localizados em lados opostos do lóbulo principal do diagrama. A LFMP é dada por (Balanis, 2005):

$$LFMP = \frac{52^\circ \lambda_0^{\frac{3}{2}}}{C \sqrt{NS}} \quad (2.22)$$

Outro parâmetro a ser definido é a Largura de Feixe Entre Nulos (LFEN), a qual é definida como o ângulo que separa os primeiros nulos relacionados ao lóbulo principal. A LFEN é dada por (Balanis, 2005):

$$LFEN = \frac{115^\circ \lambda_0^{\frac{3}{2}}}{C \sqrt{NS}} \quad (2.23)$$

A diretividade pode ser calculada por (Balanis, 2005):

$$D = 15N \frac{C^2 S}{\lambda_0^3} \quad (2.24)$$

Já o ganho da antena, é definido por (Balanis, 2005):

$$G = \frac{26000}{LFMP^2} = 6,2 \left(\frac{C}{\lambda_0} \right)^2 N \frac{S}{\lambda_0} \quad (2.25)$$

A Razão Axial (RA) (Balanis, 2005):

$$RA = \frac{2N + 1}{2N} \quad (2.26)$$

O diagrama de campo, que considera N fontes e pode ser considerado uma multiplicação de diagramas (Balanis, 2005), é dado por:

$$E = \text{sen}\left(\frac{\pi}{2N}\right) \cos \theta \frac{\text{sen}\left[\left(\frac{N}{2}\right)\psi\right]}{\text{sen}\left[\frac{\psi}{2}\right]} \quad (2.27)$$

sendo que:

$$\psi = k_0 \left(S \cos \theta \frac{-L_0}{p} \right) \quad (2.28)$$

representa a fase relativa entre as voltas da hélice e p é considerado como a razão entre a velocidade de deslocamento da onda na hélice e a velocidade de deslocamento da onda no espaço livre.

O valor de p é calculado com base em duas situações. Para a irradiação *end-fire* ordinária, não há defasagem entre o campo irradiado entre as espiras, e p é dado por (Balanis, 2005):

$$p = \frac{\frac{L_0}{\lambda_0}}{\frac{S}{\lambda_0} + 1} \quad (2.29)$$

Já para a condição de Hansen-Woodyard, referente a uma rede de antenas, há uma defasagem de $\pm\pi$ radianos do campo irradiado entre a primeira e a última espira, o que leva a uma máxima irradiação. Neste caso, o valor de p assume (Balanis, 2005):

$$p = \frac{\frac{L_0}{\lambda_0}}{\frac{S}{\lambda_0} + \frac{2N+1}{2N}} \quad (2.30)$$

Sendo essa a condição para diretividade aumentada. Essa condição também se mantém devido à propriedade de a velocidade de fase da hélice se ajustar para manter essa condição, se obedecidos os intervalos de valores citados anteriormente. Isso também explica a operação em banda larga, mantendo a operação no moxo axial.

2.3.1 Exemplo de Projeto de Uma Antena Helicoidal no Modo Axial

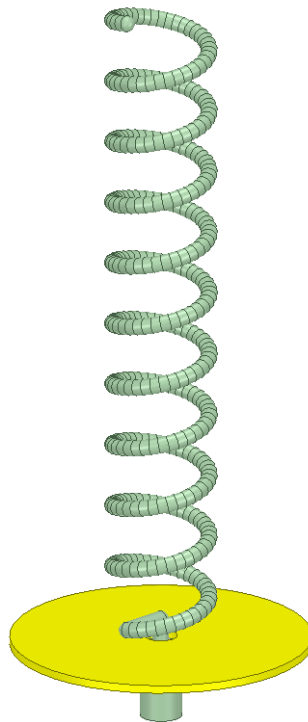
Para demonstrar o funcionamento de uma antena helicoidal no modo axial, operando na Banda X, uma hélice de 10 espiras, com frequência central de operação de 8 GHz, foi projetada através do software Ansys HFSS, onde foi feita sua construção, análise e simulação. A estrutura projetada é apresentada na Figura 21.

Para calcular os parâmetros construtivos da antena, primeiramente deve-se saber o comprimento de onda na frequência central de operação. Através de 2.12, obtém-se que o comprimento de onda

λ_0 é igual a 37.5mm. Com isso, para a operação da antena na frequência desejada, a circunferência C da hélice é adotada como sendo igual ao comprimento de onda, ou seja, $C = \lambda_0$, resultando em um diâmetro da hélice D_H igual a 11.94mm. Conforme discutido nas seções anteriores, o ângulo de pitch α utilizado é de 12°, a fim de se obter o melhor desempenho da antena, com operação em banda larga. Através da equação 2.3, é possível calcular o passo S da antena, obtendo-se que $S = 7.97mm$. A espessura E_T do plano terra foi adotada como sendo igual a 1mm, e seu diâmetro D_T , como sendo igual a λ_0 . Foi considerado um diâmetro D_C do condutor igual a 1mm. Para uma otimização na perda de retorno S_{11} da antena, foi escolhido um espaçamento H_{ESP} entre a primeira volta da hélice e o plano terra igual 1.5mm. Sabendo-se do passo e da circunferência da hélice, é possível calcular o comprimento de uma volta. Através da equação 2.4, obtém-se que $L = 38.34mm$. Uma vez que o número de voltas adotado foi igual a 10, o comprimento total do condutor da hélice, calculado através da equação 2.5 é de $L_C = 383.40mm$.

A fim de fornecer a alimentação para antena, foi utilizado um conector SMA fêmea reto de base quadrada, com impedância de 50 Ω . A construção desse conector foi baseada no projeto do conector da marca KLC Conectores, de código 3003. Na prática, para prover a alimentação da antena, um cabo coaxial é conectado ao conector SMA, sendo que o condutor interno do cabo coaxial é responsável por prover a alimentação da antena. Já o condutor externo do cabo coaxial, é interligado ao plano terra através da parte externa do conector, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Antena helicoidal operando na banda X.



Fonte: Próprio Autor.

Através de 2.24, e considerando que $C = \lambda_0$, tem-se que a diretividade teórica calculada para a antena exemplificada é:

$$D = 15N \frac{C^2 S}{\lambda_0^3} = 15N \frac{S}{\lambda_0} = 15 \cdot 10 \frac{0,00797}{0,0375}$$

$$D(\text{dB}) = 10 \log_{10} 31,88 = 15,03$$

A Figura 22 revela a diretividade da antena simulada, atingindo o valor de 14.21 dB.

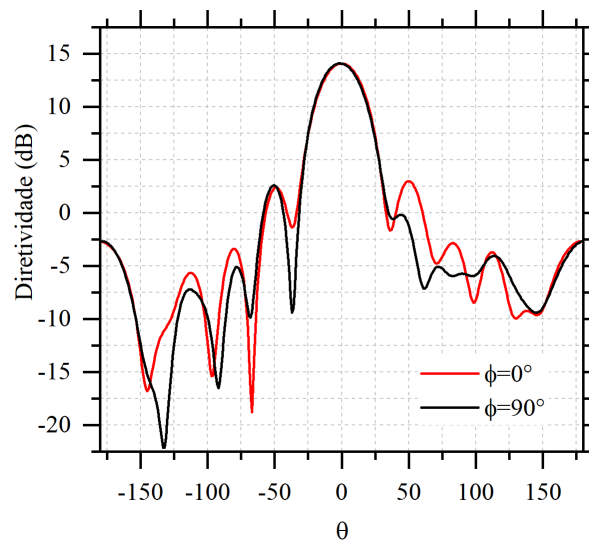
Através de diversos ajustes nos parâmetros da antena, é possível aumentar a diretividade da antena na prática, como será visto nas análises posteriores.

A Largura de Feixe Entre Nulos, calculada através da equação 2.23, é dada por:

$$LFEN = \frac{115^\circ \cdot 0,0375^{\frac{3}{2}}}{0,0375 \sqrt{10 \cdot 0,00797}} = 78,88^\circ$$

Através das simulações, foi possível estimar que $LFEN = 66.88^\circ$.

Figura 22 – Diretividade.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 22 também demonstra a comparação entre a diretividade quando $\phi = 0^\circ$ e $\phi = 90^\circ$. É possível notar grande simetria entre os planos, com algumas discrepâncias fora do lóbulo principal, devido à geometria das conexões no trecho inicial da hélice. A diretividade se mantém praticamente idêntica no lóbulo principal do diagrama de irradiação.

Para analisar a largura de banda de operação, considerou-se a operação da antena com uma perda de retorno $S_{11} \leq -10\text{dB}$. Satisfazendo este critério, pode-se garantir que pelo menos 90% da potência que chega na entrada da antena poderá eventualmente ser convertida em ondas eletromagnéticas, caso

não haja perdas. Desta forma, pode-se garantir que haja no máximo 10% de potência refletida na direção do gerador. A largura de banda percentual pode ser definida por:

$$B(\%) = \frac{f_s - f_i}{f_c} \quad (2.31)$$

Onde:

B é a largura de banda percentual;

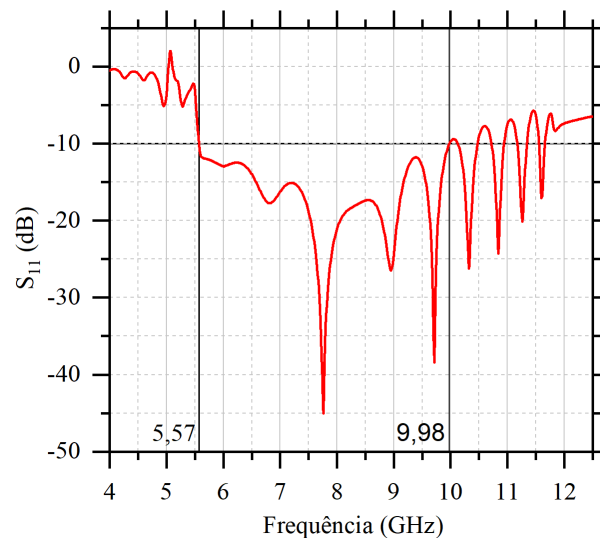
f_s é a frequência superior de operação;

f_i é a frequência inferior de operação;

f_c é a frequência central de operação.

A Figura 23, demonstra o parâmetro S_{11} da antena simulada, onde, através da equação 2.31, pode-se calcular uma largura de banda percentual de 55.12%.

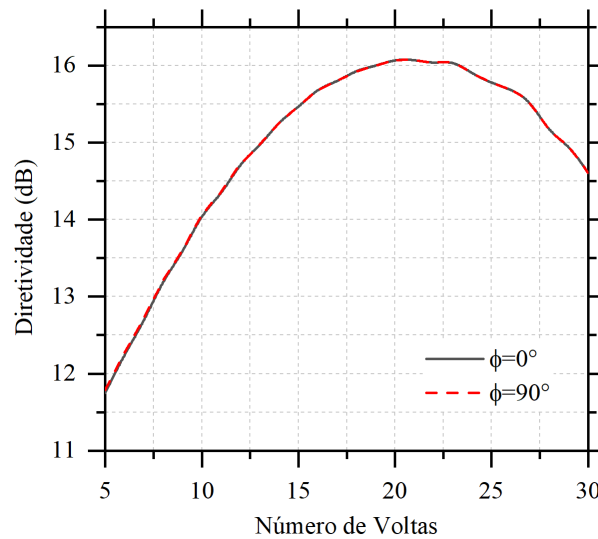
Figura 23 – Perda de Retorno.



Fonte: Próprio Autor.

A partir das simulações realizadas para o exemplo projetado, e partindo das configurações iniciais, foi possível analisar importantes parâmetros de operação como mostrados a seguir. A Figura 24 demonstra a diretividade em função do número de voltas da hélice. Para uma menor quantidade de voltas, a diretividade também apresenta valores inferiores. Para 5 voltas por exemplo, a diretividade é de aproximadamente 11,5 dB. A medida que se aumenta o número de voltas, a diretividade também aumenta, alcançando 16 dB quando a espira possui 20 voltas. Ao se aumentar o número de voltas além deste valor, a diretividade diminui novamente. Isso demonstra que há um limiar para se aumentar o número de voltas a fim de se alcançar valores maiores de diretividade. Aumentar o número de voltas indefinidamente não se reflete necessariamente em um aumento na diretividade.

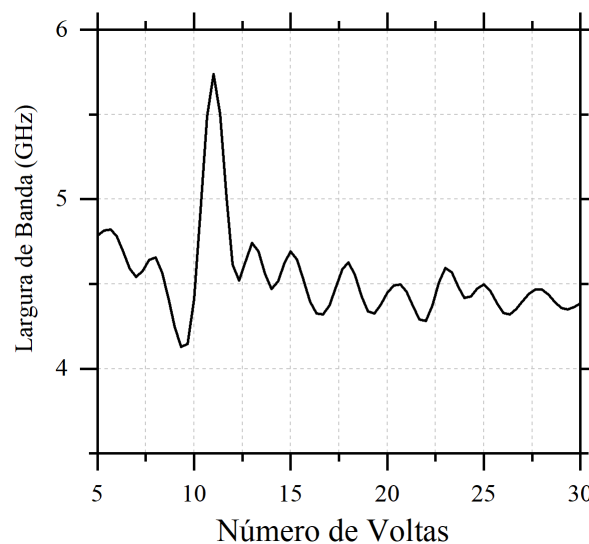
Figura 24 – Diretividade em função do número de voltas da hélice.



Fonte: Próprio Autor.

Com base na Figura 25, verifica-se que o número de voltas da hélice não é um fator determinante para a largura de banda. Porém, observa-se a ocorrência de uma menor largura de banda para uma hélice com 9 voltas, e uma maior largura de banda para uma hélice que possui 11 voltas.

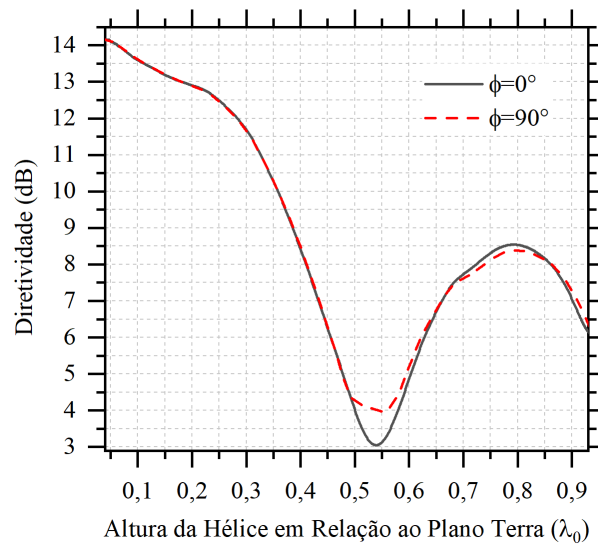
Figura 25 – Largura de banda em função do número de voltas da hélice.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 26 ilustra a diretividade em função da altura da hélice em relação ao plano terra. É possível observar que há uma diminuição da diretividade conforme a distância entre a espira e o plano terra aumenta. Isso vai de encontro ao que foi descrito no capítulo anterior, onde é relatado que melhores valores de diretividade são alcançados quando a espira se encontra o mais próxima possível do plano terra. Para o caso em questão, não foi possível analisar distâncias inferiores a 1mm , pois distâncias inferiores a essa levariam ao contato entre o plano terra e o primeiro elo da hélice.

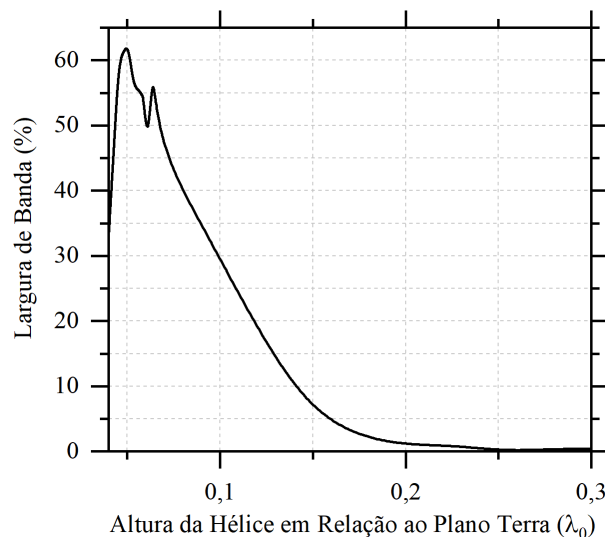
Figura 26 – Diretividade em função da altura da hélice em relação ao plano terra.



Fonte: Próprio Autor.

Através da figura Figura 27, é possível verificar a banda em função da altura da hélice em relação ao plano terra. Conforme descrito em (Balanis, 2005), a antena possui um melhor desempenho quando a hélice está o mais próxima possível da base. Com isso, verifica-se que a largura de banda é maior para valores menores de H_{ESP} . Conforme H_{ESP} aumenta, a largura de banda diminui e chega a zero quando $H_{ESP} = \frac{\lambda_0}{3}$

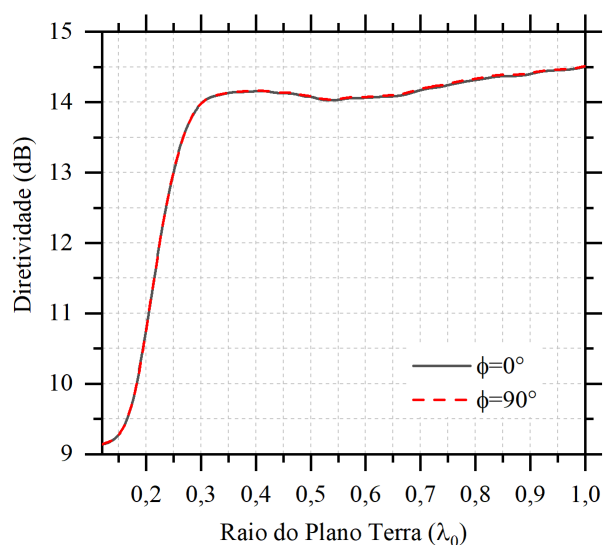
Figura 27 – Largura de banda em função da altura da hélice em relação ao plano terra.



Fonte: Próprio Autor

A partir da figura Figura 28, observa-se influência do raio do plano terra na diretividade da antena. Valores abaixo de $5mm$ não puderam ser analisados, pois para estes valores, o plano terra se tornaria menor que a base do conector utilizado. Para valores menores do raio, também há a ocorrência de valores baixos de diretividade.

Figura 28 – Diretividade em função do raio do plano terra.

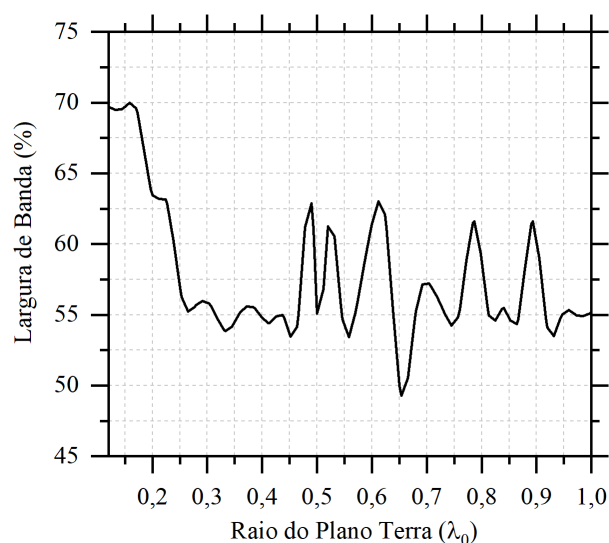


Fonte: Próprio Autor.

A medida que o valor do raio é aumentado até $12,5\text{mm}$ ou $\frac{\lambda_0}{3}$, isso leva a um grande aumento da diretividade, alcançando aproximadamente 14 dB. Ao se aumentar o valor do raio além de $\frac{\lambda_0}{3}$, não há praticamente nenhum incremento no valor da diretividade, a qual se mantém no mesmo patamar. Isso demonstra que não há efetividade em se utilizar um plano terra com grandes dimensões.

A Figura 29 demonstra a largura de banda em função do raio do plano terra. A antena apresenta valores maiores de banda quando $r < \frac{\lambda_0}{3}$. Porém, como mostrado na figura anterior, para estes valores de r , a antena apresenta baixa diretividade. Portanto, para maximizar o desempenho em termos de diretividade, r deve ser maior que $\frac{\lambda_0}{3}$.

Figura 29 – Largura de banda em função do raio do plano terra.



Fonte: Próprio Autor.

3 ANTENAS HELICOIDAIS COM ÂNGULO DE PITCH NÃO-UNIFORME

As antenas helicoidais com ângulo de pitch não-uniforme, são antenas cujos parâmetros construtivos não são estabelecidos de forma linear. Entre esses podemos citar o diâmetro da hélice D_H , o espaçamento entre as espiras (S) e o diâmetro do fio condutor (D_c). Para a construção desse tipo de antena, também pode haver configurações de projeto que combinam a não-uniformidade de mais de um parâmetro construtivo.

A fim de analisar o comportamento de uma hélice, diversos modelos podem ser propostos para se obter variações não-uniformes no passo da hélice, no diâmetro da hélice, ou a combinação destes dois casos. As equações propostas a seguir, em coordenadas cartesianas (x, y, z) , podem ser empregadas para descrever um modelo para análise.

$$x(\ell) = R \frac{e^{\alpha_\rho z(\ell)/H} - 1}{e^{\alpha_\rho} - 1} \cos(2\pi N \ell) \quad (3.1)$$

$$y(\ell) = R \frac{e^{\alpha_\rho z(\ell)/H} - 1}{e^{\alpha_\rho} - 1} \text{sen}(2\pi N \ell) \quad (3.2)$$

$$z(\ell) = H \frac{e^{\alpha_z \ell} - 1}{e^{\alpha_z} - 1} \quad (3.3)$$

Onde:

N é o número de voltas da hélice;

H é o comprimento axial da hélice (NS);

R é o raio máximo da hélice;

ℓ é o comprimento normalizado do fio condutor, com valor entre 0 e 1;

α_ρ é o coeficiente que exerce controle sobre o perfil radial da hélice;

α_z é o coeficiente que exerce controle sobre o perfil axial da hélice.

Tomando como exemplo uma hélice com $N = 5$, $H = 8$ cm, e $r = 4$ cm, é possível se obter diferentes geometrias para uma hélice não-uniforme ao se variar os parâmetros α_ρ e α_z . Através da variação destes parâmetros, é possível controlar o diâmetro da hélice (D_H), o qual é controlado por α_ρ , bem como o espaçamento entre as espiras (S), o qual é controlado por α_z . Os casos a seguir demonstram a variedade de geometrias que são possíveis de se obter utilizando o método proposto.

3.1 GEOMETRIA DE ANTENAS HELICOIDAIS NÃO-UNIFORMES

3.1.1 Casos Particulares

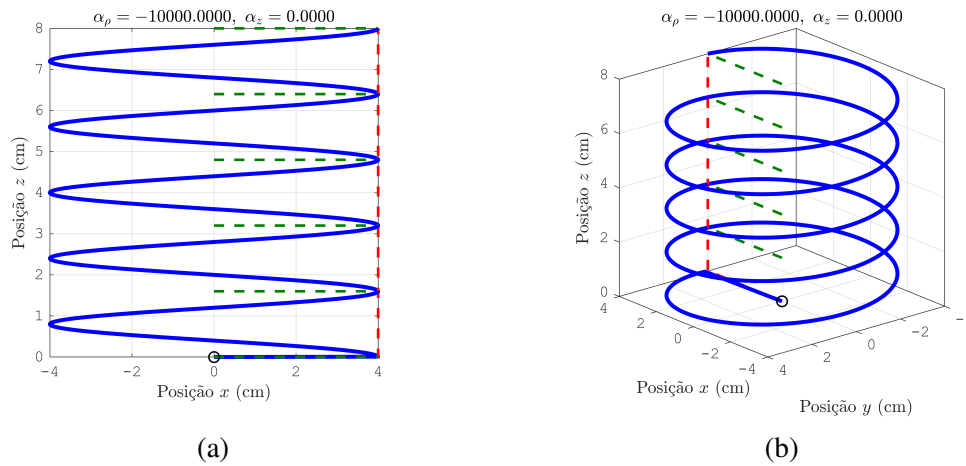
3.1.1.1 Geometria Convencional

Quanto menor for o valor de α_ρ , a geometria se aproximará do formato convencional. Através da utilização dos parâmetros $\alpha_\rho = -10000$ e $\alpha_z = 0$, é possível se obter uma hélice com geometria

semelhante a hélice do exemplo apresentada na seção 2.3.1, na qual a hélice possui ângulo de pitch e raio uniformes, conforme ilustrado na Figura 30.

O comportamento e parâmetros de operação são semelhantes aos da hélice do exemplo mencionado, o que implica que este é um caso particular de uma antena helicoidal não-uniforme.

Figura 30 – Antena com $\alpha_\rho = -10000$ e $\alpha_z = 0$.

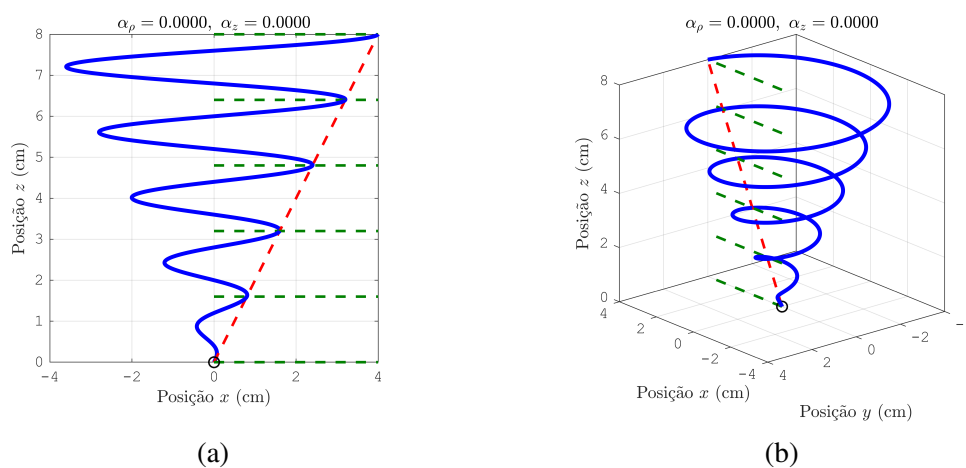


Fonte: Próprio autor.

3.1.1.2 Geometria Com Passo de Hélice Uniforme e Raio Crescente de forma Linear

Outro caso particular se configura através da utilização dos parâmetros $\alpha_\rho = 0$ e $\alpha_z = 0$. Com essa configuração, a geometria da hélice é caracterizada pelo aumento linear do raio ao longo da espira e passo da hélice uniforme. A geometria em questão é apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Geometria Com $\alpha_\rho = 0$ e $\alpha_z = 0$.



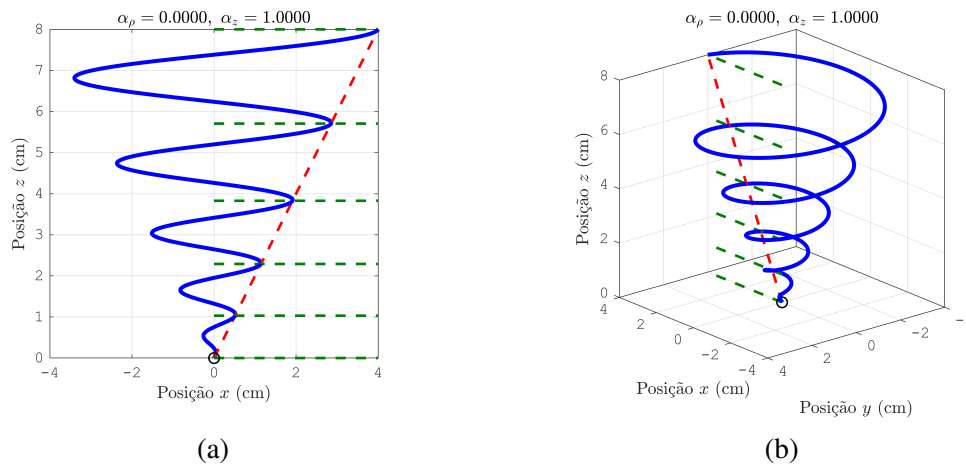
Fonte: Próprio autor.

3.1.2 Geometrias Com Raio Crescente

3.1.2.1 Geometria Com $\alpha_\rho = 0$ e $\alpha_z \neq 0$

As figuras a seguir demonstram as geometrias de hélices não-uniformes com um aumento linear do raio, através da utilização de $\alpha_\rho = 0$, conforme descrito anteriormente. Aplicando o valor de $\alpha_z = 1$, a geometria da hélice é caracterizada por uma diminuição no passo da hélice, quanto mais próximo da base for o elo em questão, conforme ilustrado na Figura 32. Ao se adotar valores maiores para α_z , a distância dos elos próximos a base tendem a ficar cada vez menores.

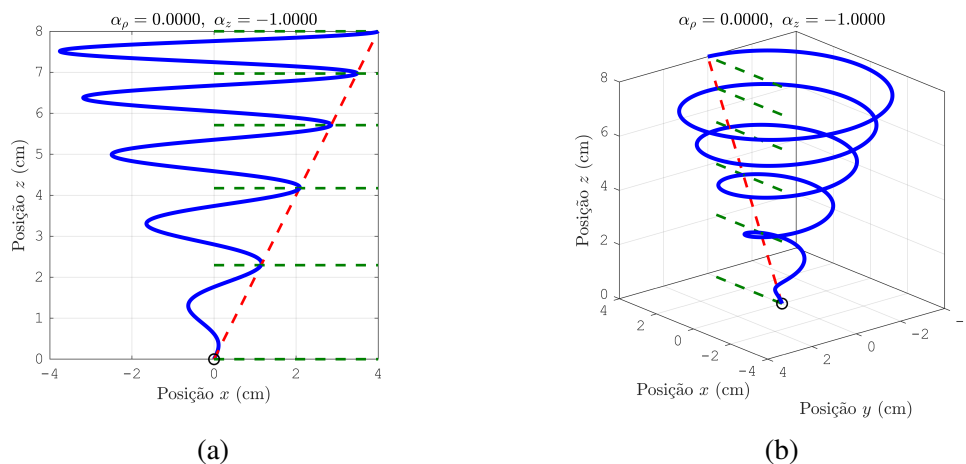
Figura 32 – Antena com $\alpha_\rho = 0$ e $\alpha_z = 1$.



Fonte: Próprio autor.

Aplicando-se o valor de $\alpha_z = -1$, a geometria da hélice é caracterizada por uma diminuição no passo da hélice, quanto mais distante da base for o elo em questão, conforme ilustrado na Figura 33. Ao se adotar valores menores para α_z , a distância dos elos próximos ao final da hélice tendem a ficar cada vez menores.

Figura 33 – Antena com $\alpha_\rho = 0$ e $\alpha_z = -1$.

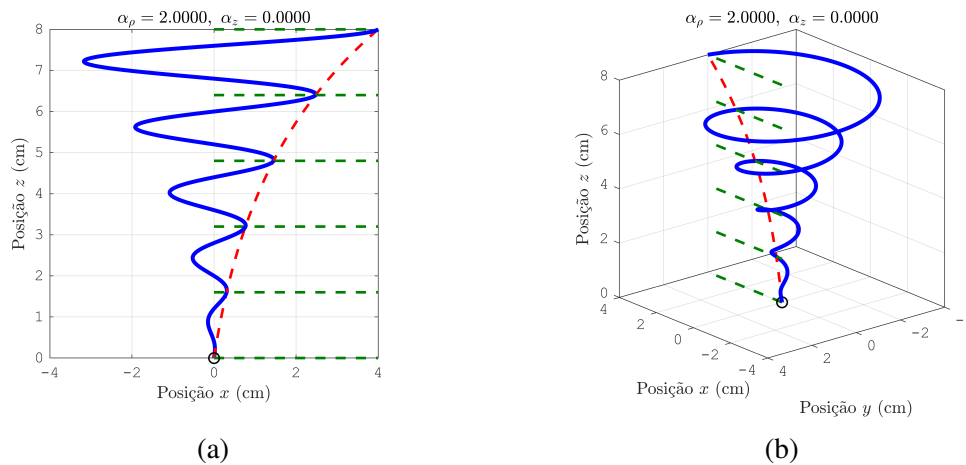


Fonte: Próprio autor.

3.1.2.2 Geometria Com $\alpha_\rho \neq 0$ e $\alpha_z = 0$

Ao se adotar valores positivos para α_ρ , como por exemplo $\alpha_\rho = 2$ em conjunto com $\alpha_z = 0$, é possível se obter uma geometria com o passo da hélice uniforme ao longo da estrutura e um raio crescente. A Figura 34 demonstra esta geometria, a qual é caracterizada por elos com raio menor próximos a base e que aumentam de forma exponencial ao final da hélice.

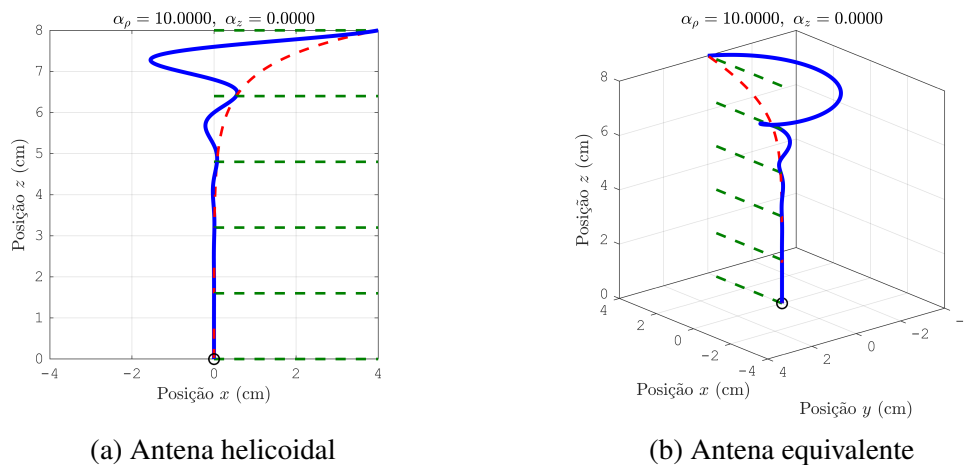
Figura 34 – Antena helicoidal com $\alpha_\rho = 2$ e $\alpha_z = 0$.



Fonte: Próprio autor.

Quanto maior for o valor de α_ρ , mais abrupta será essa transição entre o tamanho do raio dos elos ao final da hélice, conforme a Figura 35, onde é adotado $\alpha_\rho = 10$.

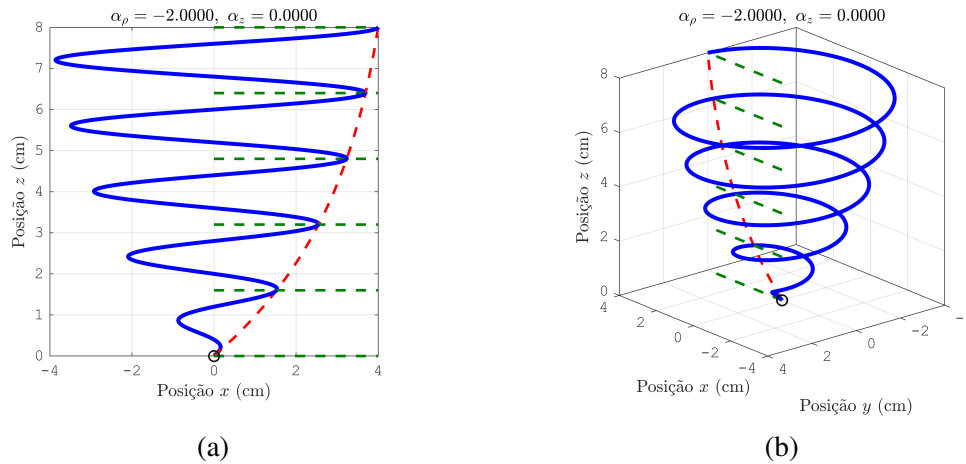
Figura 35 – Antena com $\alpha_\rho = 10$ e $\alpha_z = 0$.



Fonte: Próprio autor.

Ao se adotar valores negativos para α_ρ , como $\alpha_\rho = -2$ em conjunto com $\alpha_z = 0$, há um aumento exponencial no raio da hélice nas proximidades da base, conforme mostra a Figura 36.

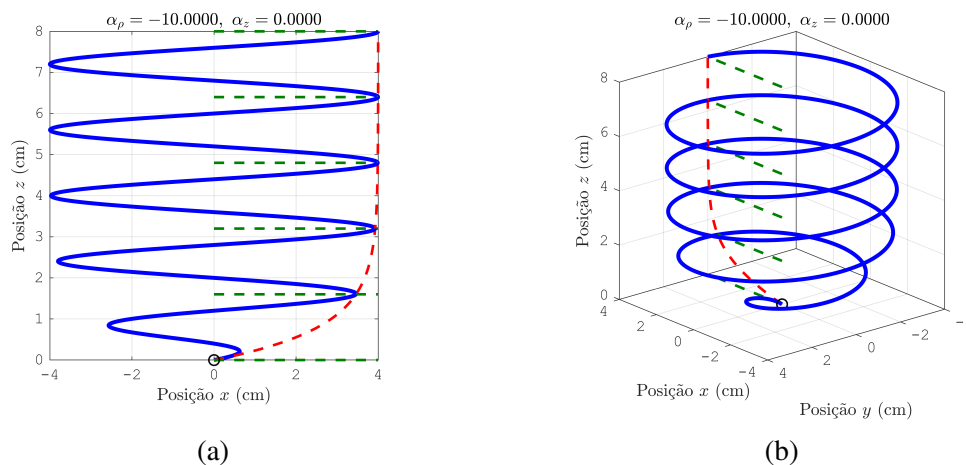
Figura 36 – Antena com $\alpha_\rho = -2$ e $\alpha_z = 0$.



Fonte: Próprio autor.

Quanto menor for o valor de α_ρ , mais abrupta será essa transição entre o tamanho do raio dos elos nas proximidades da base da hélice, conforme a Figura 37, onde $\alpha_\rho = -10$. Lembrando que quanto menor for o valor de α_ρ , mais a hélice se aproximará do modelo convencional, conforme mencionado anteriormente.

Figura 37 – Antena com $\alpha_\rho = -10$ e $\alpha_z = 0$.



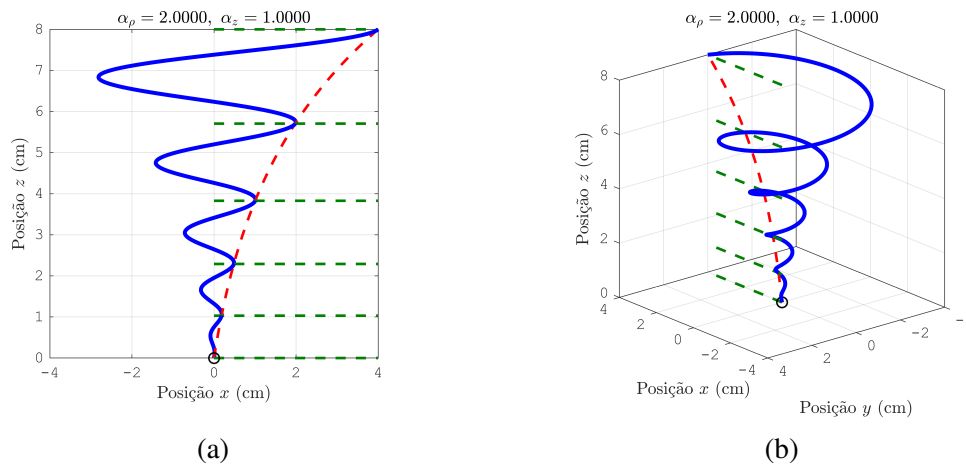
Fonte: Próprio autor.

3.1.2.3 Geometria Com $\alpha_\rho \neq 0$ e $\alpha_z \neq 0$

Aplicando-se as duas variações anteriores, onde $\alpha_\rho \neq 0$, bem como $\alpha_z \neq 0$, obtém-se uma geometria não-uniforme em termos do raio e do passo da hélice. A Figura 38, ilustra uma hélice onde

$\alpha_\rho = 2$ e $\alpha_z = 1$, o que leva a uma geometria com um aumento exponencial do raio ao final da hélice e elos menos distantes nas proximidades da base.

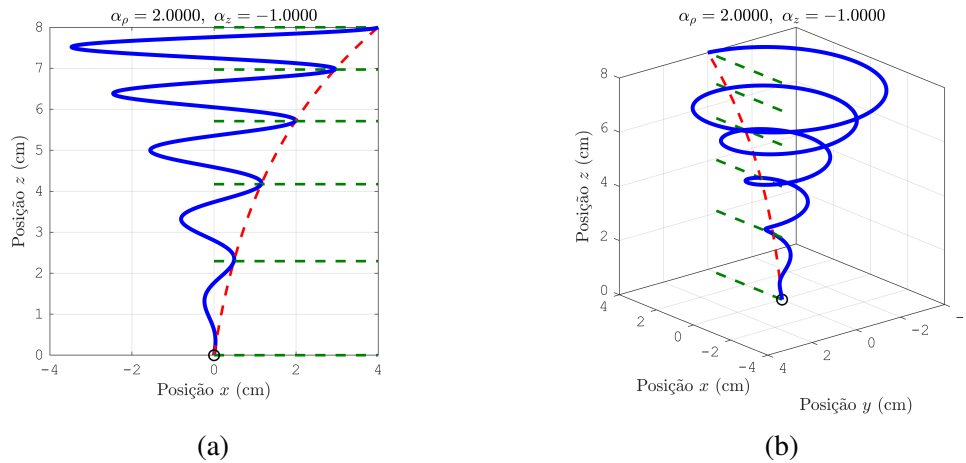
Figura 38 – Antena com $\alpha_\rho = 2$ e $\alpha_z = 1$.



Fonte: Próprio autor.

Já ao se utilizar $\alpha_\rho = 2$ e $\alpha_z = -1$, a geometria é caracterizada por um aumento exponencial do raio e elos menos distantes ao final da hélice, conforme a Figura 39.

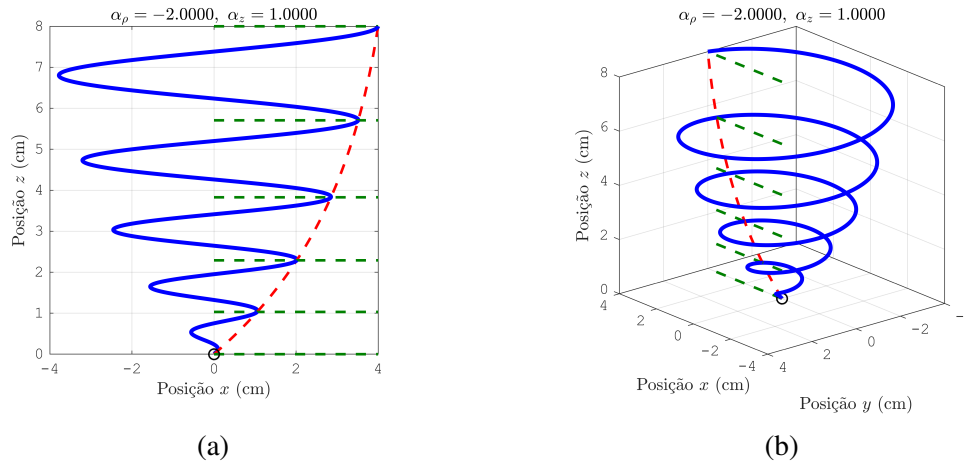
Figura 39 – Antena com $\alpha_\rho = 2$ e $\alpha_z = -1$.



Fonte: Próprio autor.

Ao se adotar $\alpha_\rho = -2$ e $\alpha_z = 1$, a geometria é caracterizada por um aumento exponencial do raio e elos menos distantes nas proximidades da base, conforme a Figura 40.

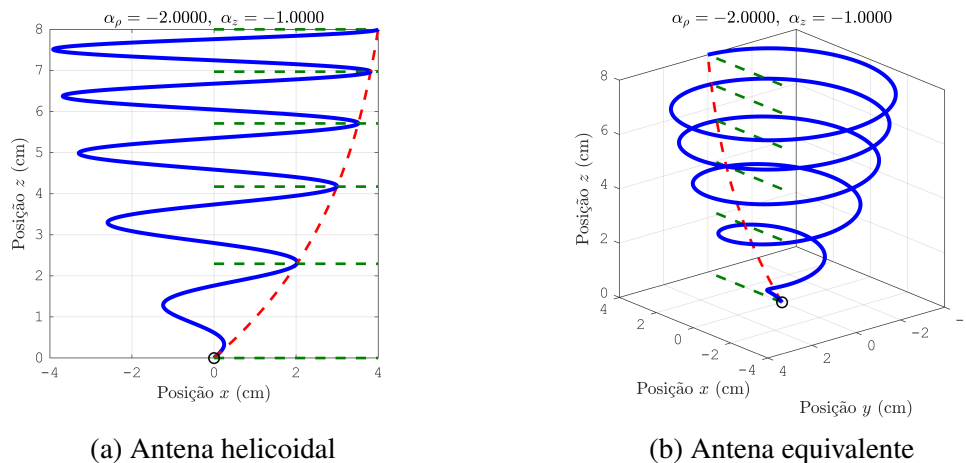
Figura 40 – Antena com $\alpha_\rho = -2$ e $\alpha_z = 1$.



Fonte: Próprio autor.

Ao se adotar $\alpha_\rho = -2$ e $\alpha_z = -1$, a geometria é caracterizada pelo aumento exponencial do raio nas proximidades da base e elos menos distantes ao final da hélice, conforme a Figura 41.

Figura 41 – Antena com $\alpha_\rho = -2$ e $\alpha_z = -1$.

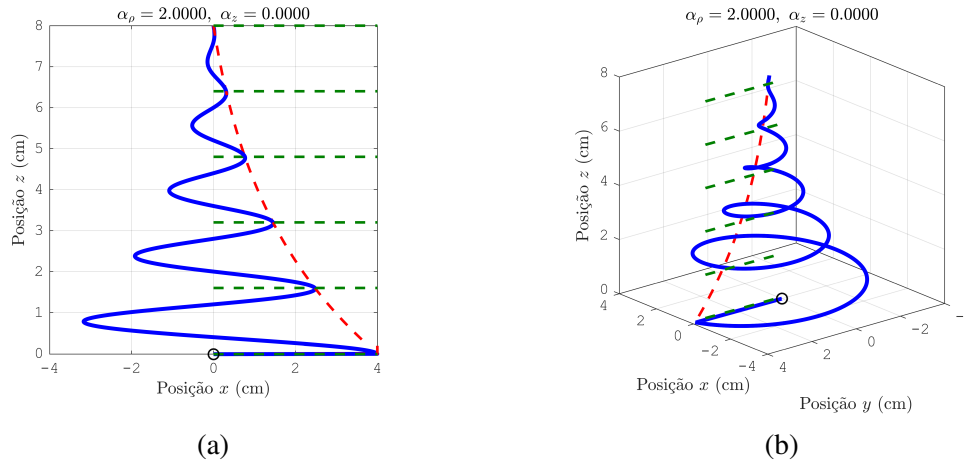


Fonte: Próprio autor.

3.1.3 Geometria Com Raio Decrescente

Outra variação possível para uma antena helicoidal não-uniforme é a geometria com raio decrescente. A criação desta variação foi possível ao se inverter a estrutura da hélice no software Ansys HFSS. Foram utilizadas as equações 3.1, 3.2 e 3.3 para descrever o comportamento de hélice, porém, ao contrário dos casos anteriores, neste caso, ao se adotar valores positivos para o parâmetro α_ρ , a hélice apresenta um raio maior nas proximidades da base, conforme a Figura 42. Quanto maior o valor de α_ρ , mais rápido é a diminuição do raio próximo a base.

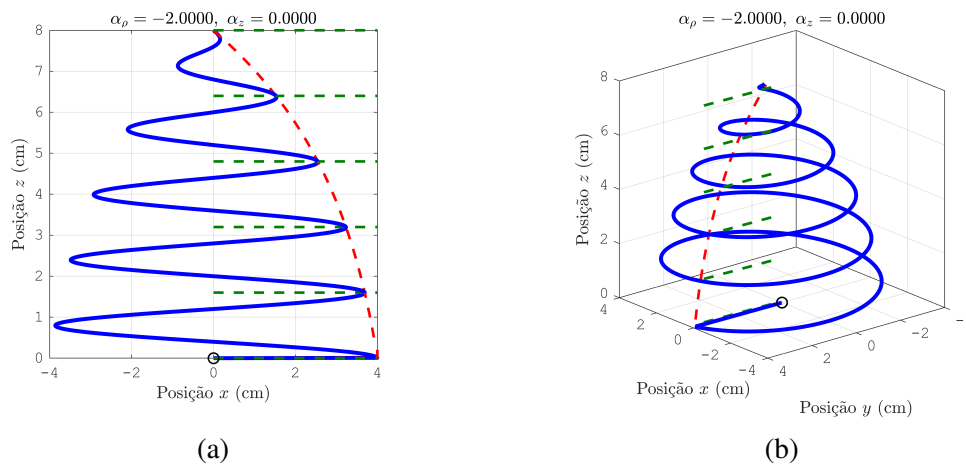
Figura 42 – Antena com $\alpha_\rho = 2$ e $\alpha_z = 0$.



Fonte: Próprio autor.

Já quando o parâmetro α_ρ assume valores negativos, a diminuição do raio ocorre ao final da estrutura, conforme a Figura 43. Quanto menor for o valor de α_ρ , a diminuição do raio ocorrerá mais próxima ao final da hélice e esta se aproximará cada vez mais de uma hélice convencional.

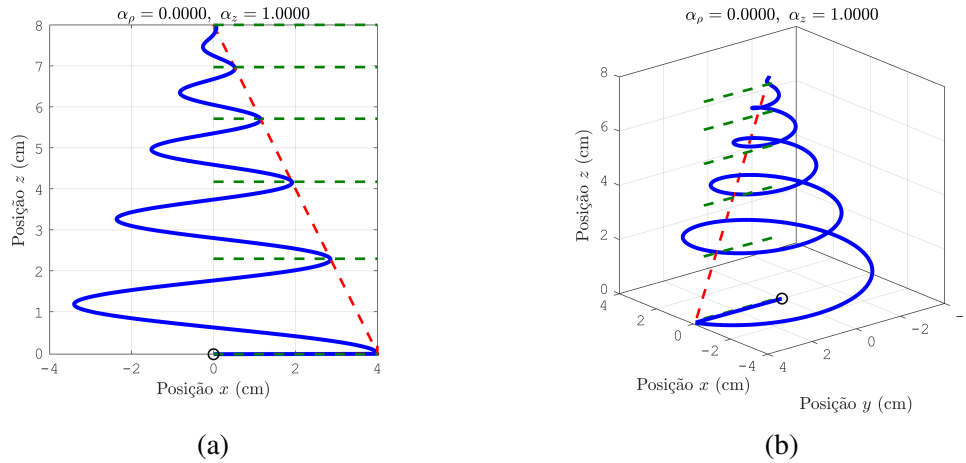
Figura 43 – Antena com $\alpha_\rho = -2$ e $\alpha_z = 0$.



Fonte: Próprio autor.

Ao se utilizar valores positivos para α_z , o passo da hélice é maior nas proximidades da base, e diminui ao final da estrutura, conforme ilustrado na Figura 44.

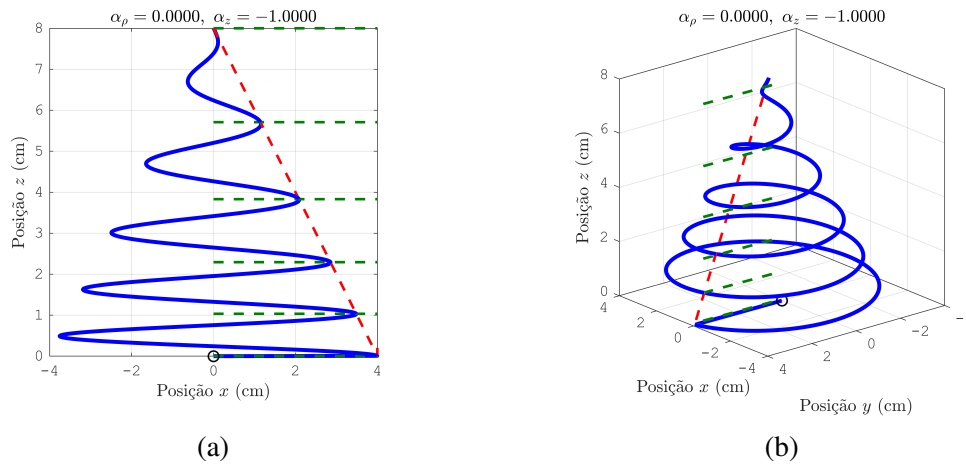
Figura 44 – Antena com $\alpha_\rho = 0$ e $\alpha_z = 1$.



Fonte: Próprio autor.

Já quando α_z assume valores negativos, o passo da hélice é menor nas proximidades da base e aumenta ao final da estrutura, conforme mostrado na Figura 45. Assim como mostrado anteriormente, é possível combinar as variações dos parâmetros α_ρ e α_z , para a criação de uma hélice com raio decrescente, com passo da helice e raio não-uniformes.

Figura 45 – Antena com $\alpha_\rho = 0$ e $\alpha_z = -1$.



Fonte: Próprio autor.

Tomando como base a antena do exemplo apresentado na seção 2.3.1, foram desenvolvidos e efetuados modelos de antenas helicoidais no software Ansys HFSS, implementadas através das equações 3.1, 3.2 e 3.3. As análises a seguir demonstram a influência dos parâmetros α_ρ e α_z no funcionamento da hélice, para os casos com raio crescente e decrescente.

3.2 ANÁLISE DE ANTENAS HELICOIDAIS COM RAIOS CRESCENTE

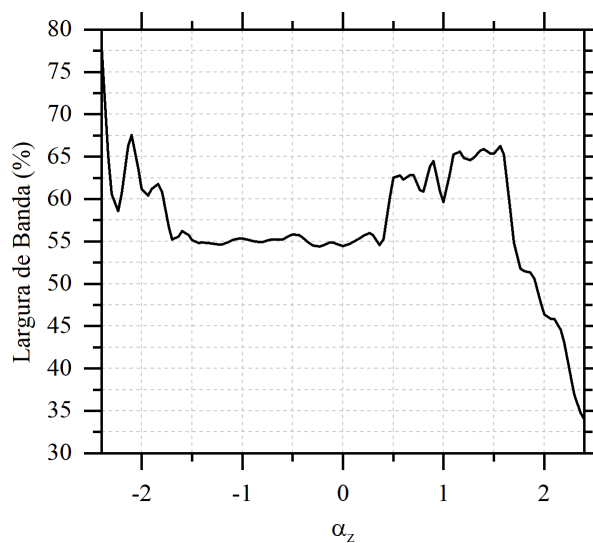
As análises a seguir, partiram da utilização da mesma antena do exemplo 2.3.1, a qual possuía $f_c = 8$ GHz, $B(\%) = 55.12$ e $D = 14.21$ dB. Porém, para os casos apresentados a seguir, foram introduzidos os coeficientes de controle de perfil radial α_ρ e perfil axial α_z .

3.2.1 Análise de Antenas Helicoidais Variando-se o Parâmetro α_z

A fim de se verificar a influência do parâmetro α_z , o qual está relacionado à distância entre os elos, nas características de funcionamento da hélice, foi realizada uma análise paramétrica, com $-2.4 \leq \alpha_z \leq 2.4$. Valores inferiores ou superiores ao intervalo citado não são possíveis, pois nesses casos, há o contato de um elo com outro, invalidando a análise.

A Figura 46 demonstra a largura de banda em função de α_z . É possível observar uma maior largura de banda para $\alpha_z \leq -1.7$ e $0.5 \leq \alpha_z \leq 1.5$. Para $-1.6 \leq \alpha_z \leq 0.4$, a largura de banda se mantém no mesmo patamar, próxima aos 56%. Para $\alpha_z \geq 1.6$, há uma diminuição da largura de banda conforme se aumenta α_z .

Figura 46 – Largura de banda em função de α_z .

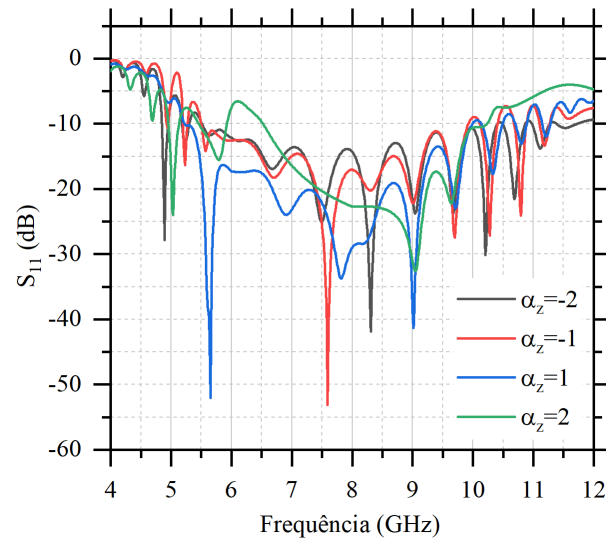


Fonte: Próprio autor.

Através desses resultados é possível notar um aumento na largura de banda de operação para determinados valores de α_z , em comparação com a hélice convencional apresentada na seção 2.3.1, a qual apresentou largura de banda de 55.12%.

A Figura 47 exibe a perda de retorno para 4 casos de α_z , demonstrando a operação na frequência projetada e as variações no casamento de impedância.

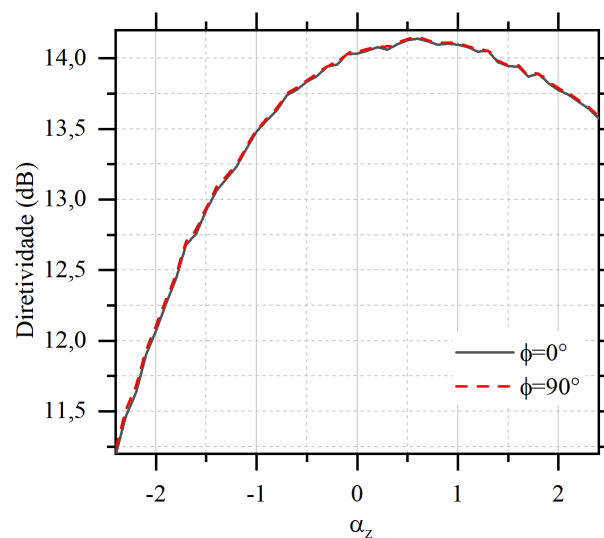
Figura 47 – Perda de retorno.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 48 indica a diretividade da hélice em função de α_z . A diretividade da hélice aumenta com o aumento de α_z , até $\alpha_z = 0.6$, quando esta atinge seu valor máximo. Para $\alpha_z > 0.6$, a diretividade diminui com o aumento de α_z . A diretividade assume valores maiores em relação à uma hélice convencional, para $0 < \alpha_z < 1.1$.

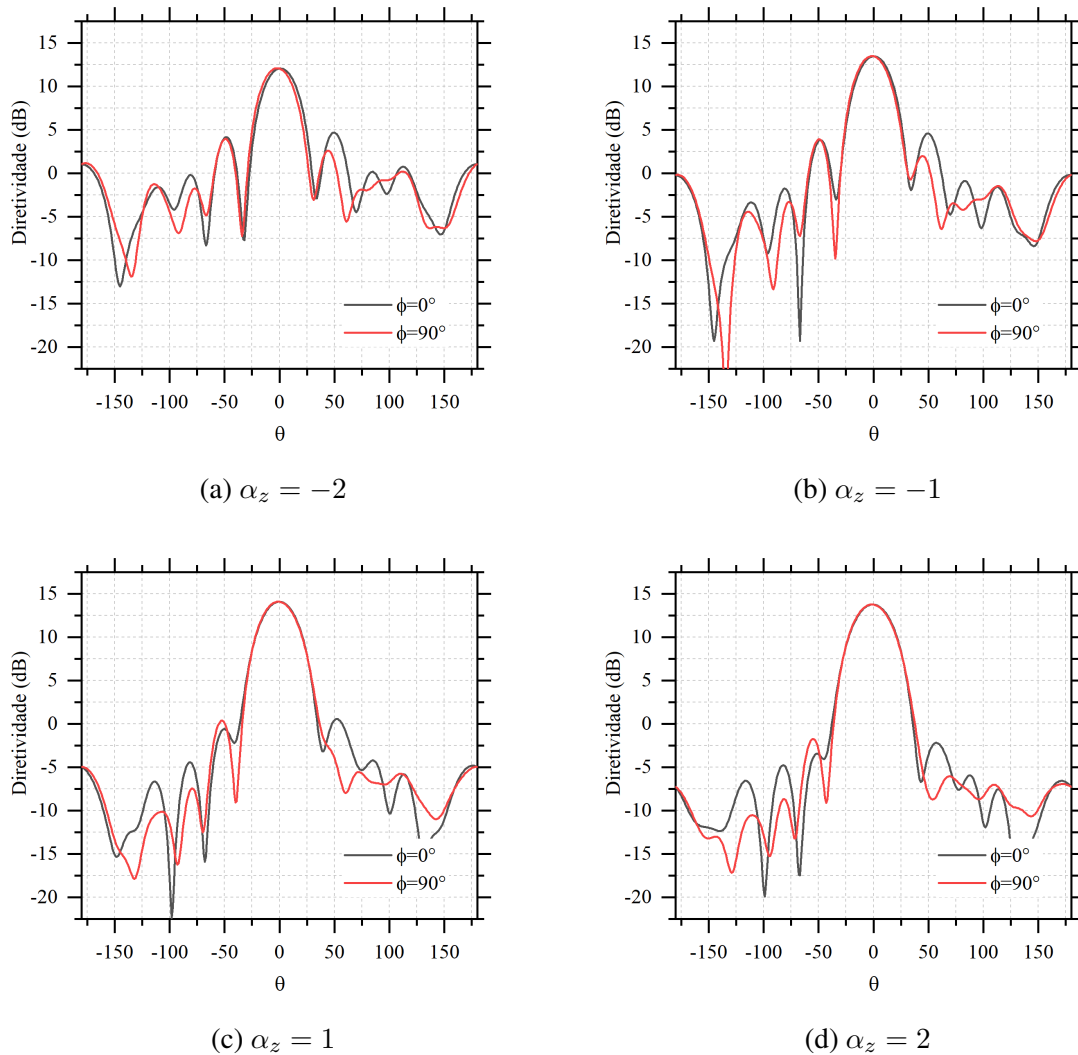
Ao se analisar os gráficos da Figura 46 e Figura 48, é possível, neste caso, estabelecer um valor ótimo para α_z . Quando $\alpha_z = 0.6$, tem-se um aumento da largura de banda, bem como o máximo valor para a diretividade.

Figura 48 – Diretividade em função de α_z .

Fonte: Próprio autor.

A Figura 49 exibe os diagramas de irradiação de diretividade para 4 casos de α_z . Com isso, é possível verificar que há semelhança entre os lóbulos principais, porém com mudanças na intensidade. Também verifica-se variações nos lóbulos secundários, decorrentes das mudanças na geometria de hélice.

Figura 49 – Diagrama de irradiação da diretividade.



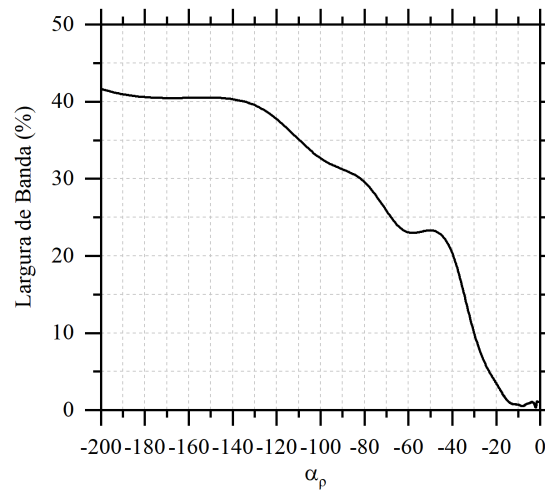
Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Análise de Antenas Helicoidais Variando-se o Parâmetro α_ρ

3.2.2.1 Análise de uma Antena Helicoidal Com $\alpha_\rho \leq 0$

Para verificar a influência do parâmetro α_ρ , que controla o diâmetro dos elos, nas características de operação da hélice, foi realizada uma análise paramétrica com $-200 \leq \alpha_\rho \leq 0$. Quanto menor for o valor de α_ρ , mais a hélice se aproxima do formato de uma hélice convencional. A medida que α_ρ assume valores maiores, há uma diminuição na banda de operação, conforme ilustrado na Figura 50.

Figura 50 – Largura de banda em função de α_p .

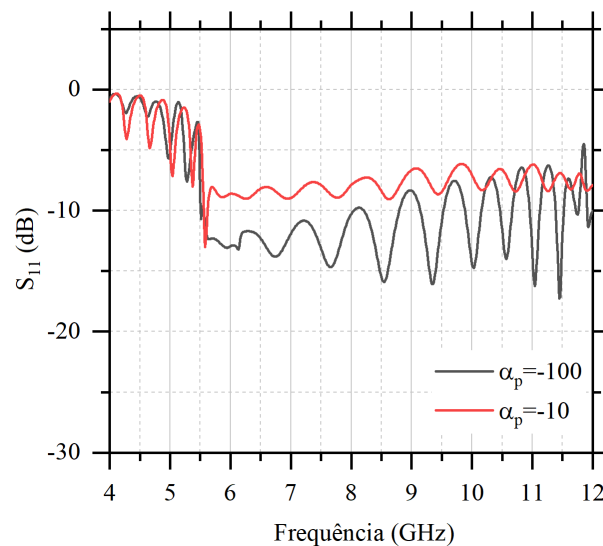


Fonte: Próprio autor.

Nota-se que para este caso, os valores de largura de banda são inferiores ao de uma hélice convencional.

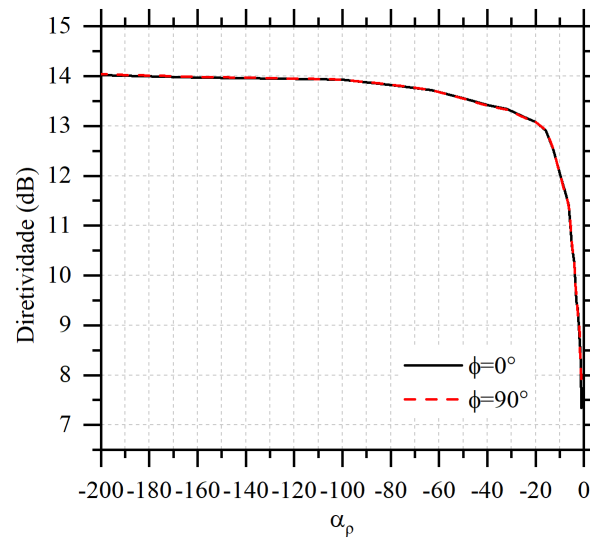
Através da Figura 51, verifica-se o casamento de impedância para 2 casos de α_p quando $\alpha_p \leq 0$.

Figura 51 – Perda de retorno.



Fonte: Próprio autor.

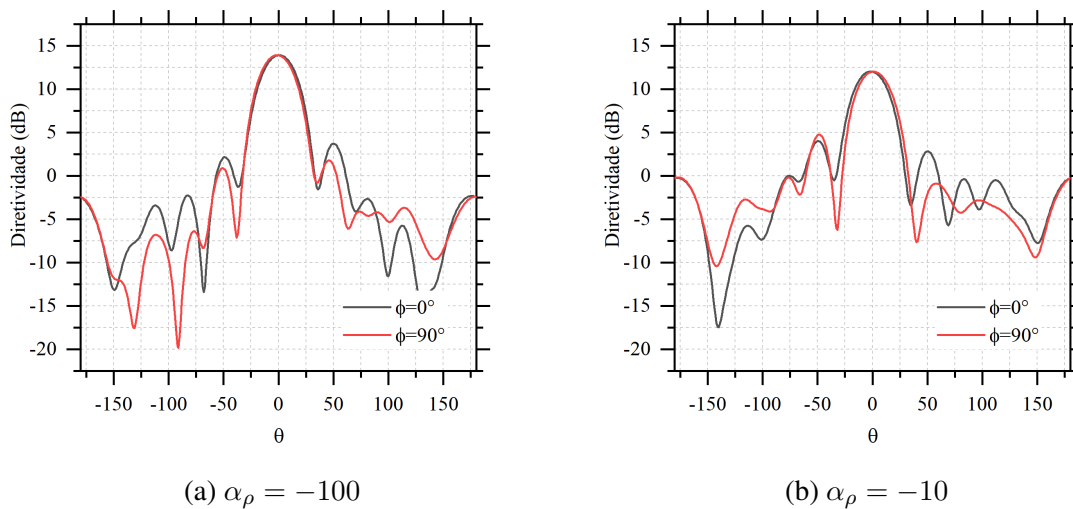
Para o intervalo em questão, a diretividade se mantém estável até $\alpha_p = -90$. Isso ocorre, pois até esse valor, a hélice ainda se assemelha ao modelo convencional. A medida que α_p assume valores maiores, também há uma diminuição na diretividade, conforme ilustrado na Figura 52.

Figura 52 – Diretividade em função de α_ρ .

Fonte: Próprio autor.

A Figura 53 exibe os diagramas de irradiação de diretividade para 2 casos de α_ρ , onde verifica-se a queda na diretividade quando $\alpha_\rho = -10$.

Figura 53 – Diagrama de irradiação da diretividade.

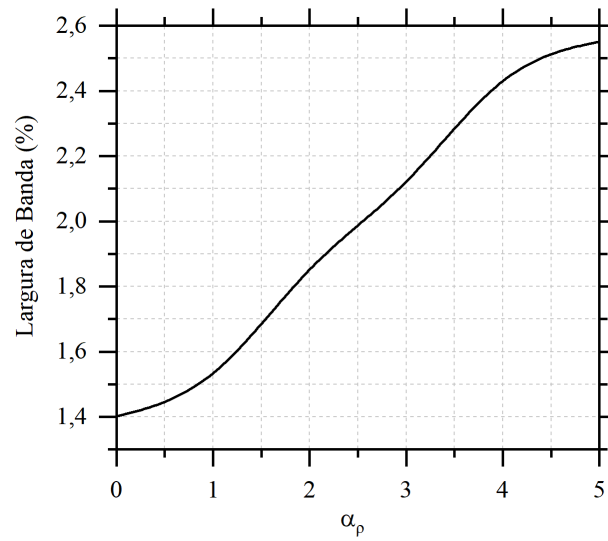


Fonte: Próprio autor.

3.2.2.2 Análise de uma Antena Helicoidal Com $\alpha_\rho \geq 0$

Ao se analisar a antena helicoidal assumindo valores positivos de α_ρ , com $0 \leq \alpha_\rho \leq 5$, observa-se que a antena opera com uma pequena largura de banda, conforme a Figura 54.

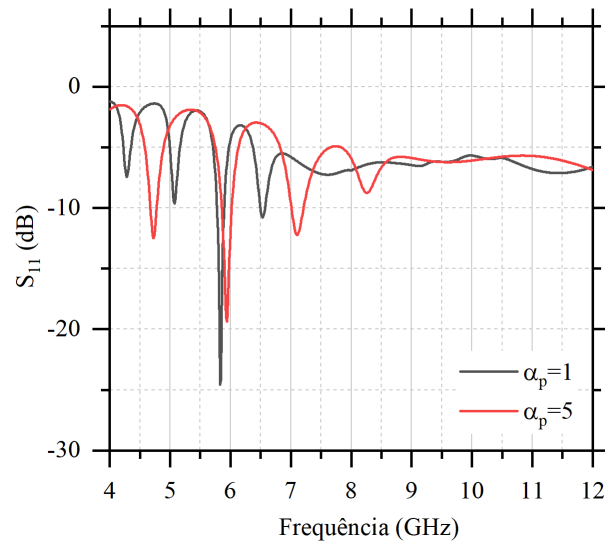
Figura 54 – Largura de banda em função de α_z .



Fonte: Próprio autor.

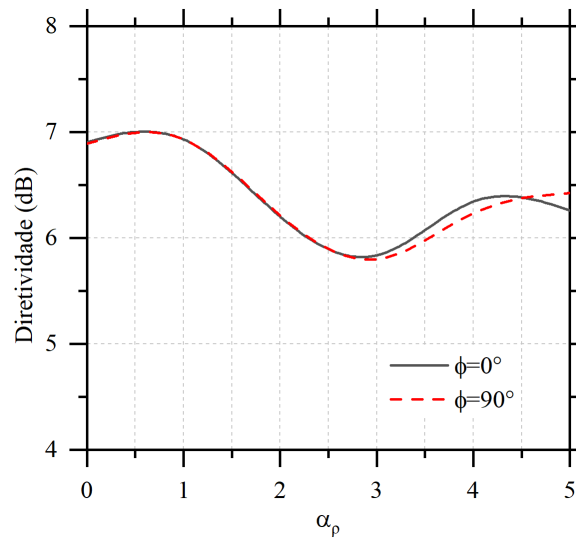
A Figura 55 exibe a perda de retorno, onde verifica-se que não há um bom casamento de impedância nesse caso.

Figura 55 – Perda de retorno.



Fonte: Próprio autor.

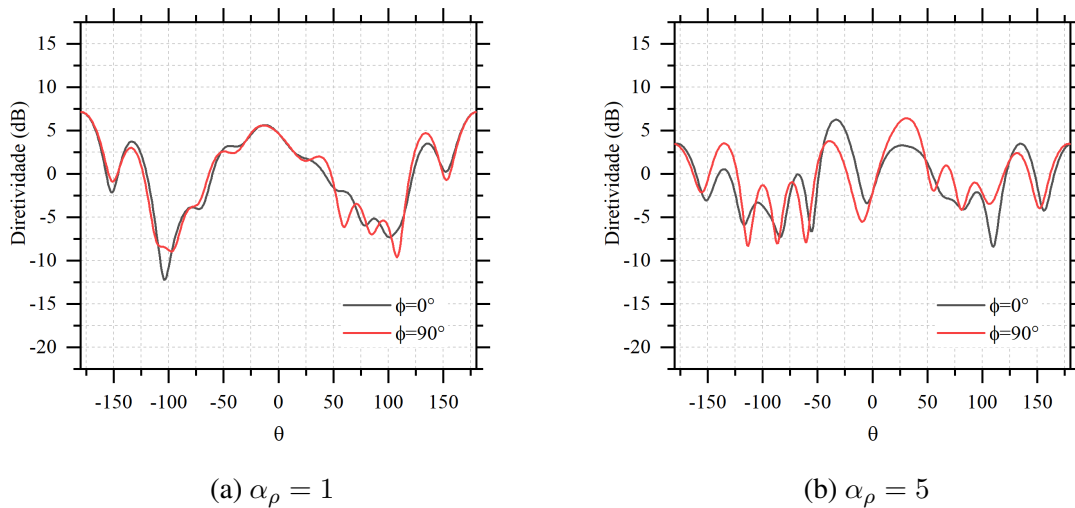
Para este caso, a diretividade também apresenta valores baixos, conforme a Figura 56. Além disso, há discrepâncias entre $\phi = 0^\circ$ e $\phi = 90^\circ$, o que indica deformidades no diagrama de irradiação.

Figura 56 – Diretividade em função de α_ρ .

Fonte: Próprio autor.

Através da Figura 57, é possível observar a baixa intensidade da diretividade, onde os lóbulos secundários apresentam intensidade semelhante ao lóbulo principal, o qual também apresenta deformidades.

Figura 57 – Diagrama de irradiação da diretividade.



Fonte: Próprio autor.

Tendo em vista a pequena largura de banda e a baixa diretividade, o modelo de antena helicoidal baseado em valores positivos de α_ρ , não se configura como um modelo interessante para aplicação, pois não dispõe das principais vantagens das antenas helicoidais, como operação em banda larga e alta diretividade.

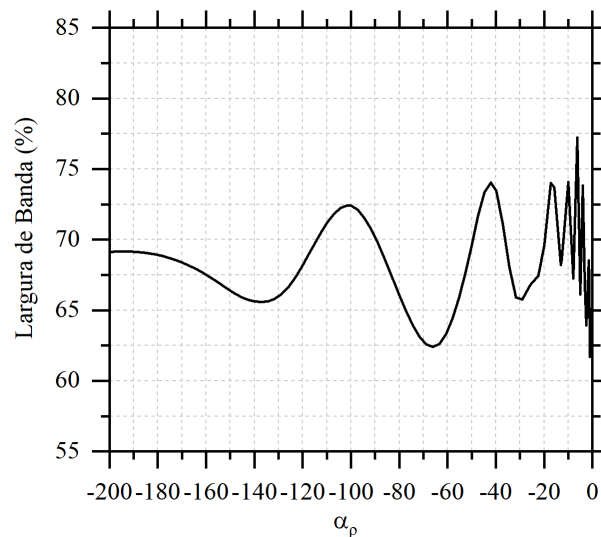
3.3 ANÁLISE DE ANTENAS HELICOIDAIS COM RAIOS DECRESCENTE

Conforme mencionado anteriormente, utilizando-se a estrutura dos exemplos anteriores e aplicando-se uma inversão de sentido no software Ansys HFSS, é possível a criação de uma antena helicoidal com raio decrescente. Para os casos a seguir, o raio da hélice possui seu valor máximo nas proximidades da base e diminui à medida que se aproxima do final da hélice a depender do valor de α_p .

3.3.0.1 Análise de uma Antena Helicoidal Com $\alpha_p \leq 0$

A Figura 58 ilustra a largura de banda em função de α_p . Para todos os valores de α_p , a antena apresenta maior largura de banda, se comparada com a antena helicoidal convencional do exemplo apresentado na seção 2.3.1, chegando a atingir 77,12% quando $\alpha_p = -6.30$.

Figura 58 – Largura de banda em função de α_p .

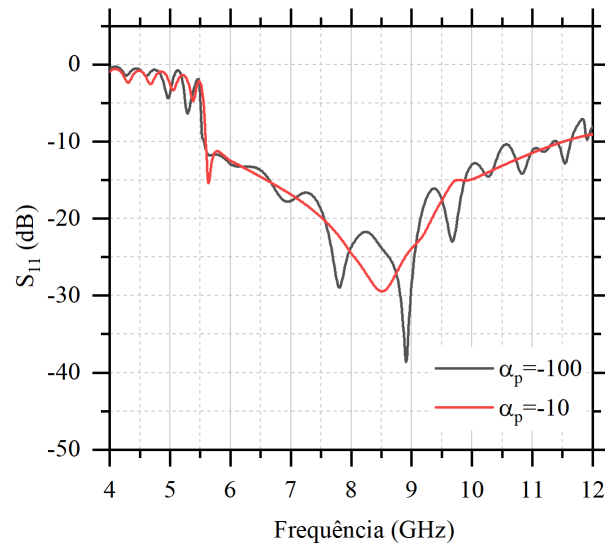


Fonte: Próprio autor.

Apesar do aumento da largura de banda quando $\alpha_p = -6.30$, para $30 \leq \alpha_p \leq 0$, há uma diminuição da diretividade, conforme a Figura 60. Sendo assim, para critérios de projeto, é necessário avaliar os requisitos referentes a largura de banda e diretividade para o melhor atendimento da demanda em questão.

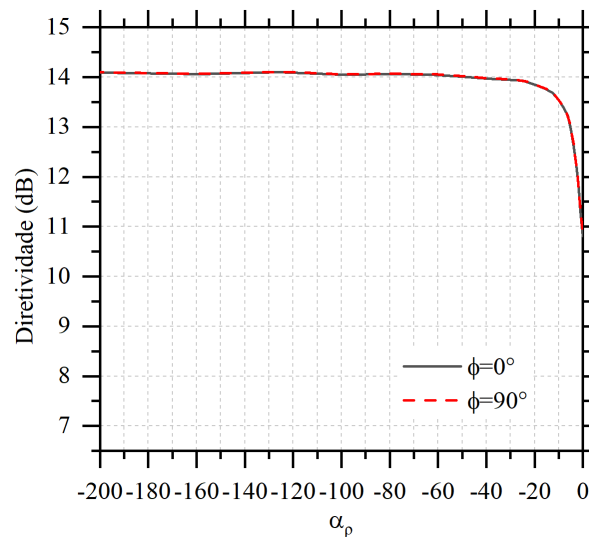
Através da Figura 59, onde são apresentados 2 casos de α_p , nota-se a operação em banda larga e o excelente casamento de impedância, onde a perda de retorno atinge valores inferiores a -30 dB.

Figura 59 – Perda de retorno.



Fonte: Próprio autor.

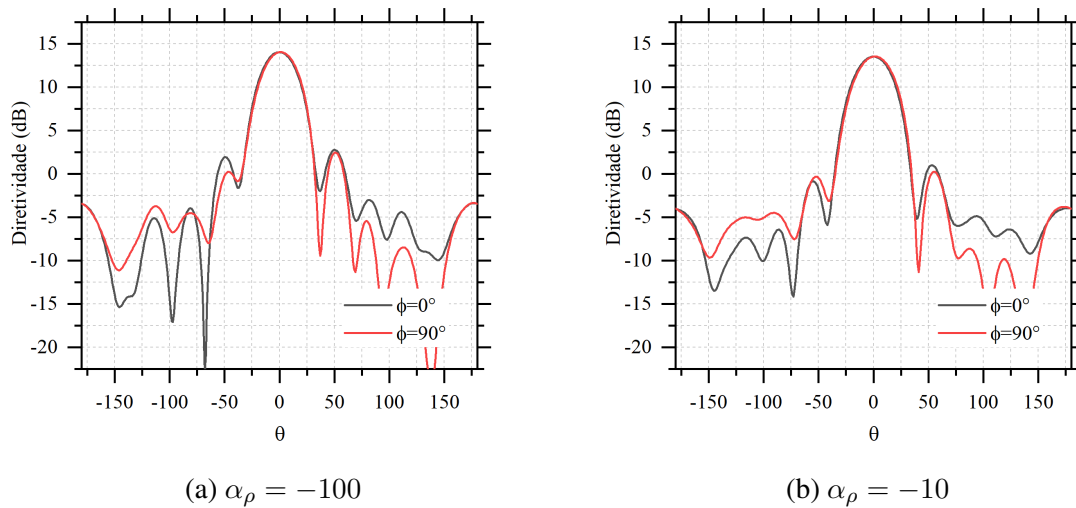
Tendo em vista o desempenho da antena apresentado neste caso, em termos da largura de banda e diretividade, pode-se estabelecer a antena com raio decrescente com $\alpha_p \leq 0$, como sendo o melhor caso avaliado, sendo útil em aplicações que desejam otimizar o desempenho da antena.

Figura 60 – Diretividade em função de α_p .

Fonte: Próprio autor.

A Figura 61, apresenta os diagramas de irradiação da diretividade para 2 casos de α_p .

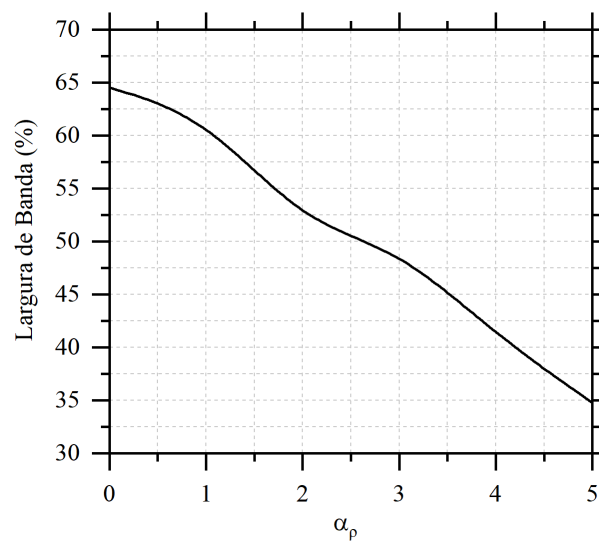
Figura 61 – Diagrama de irradiação da diretividade.



Fonte: Próprio autor.

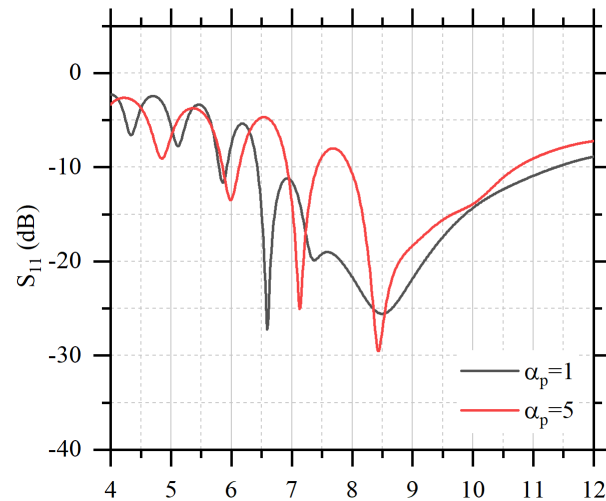
3.3.0.2 Análise de uma Antena Helicoidal Com $\alpha_\rho \geq 0$

Semelhante aos casos anteriores, quando α_ρ assume valores maiores que zero, o desempenho da antena em termos de largura de banda e diretividade diminui com o aumento de α_ρ . A Figura 62 demonstra a largura de banda quando $\alpha_\rho \geq 0$. Para este caso, a largura de banda supera a largura de banda da antena convencional apresentada anteriormente enquanto $0 \leq \alpha_\rho \leq 1.5$. A perda de retorno é apresentada na Figura 63.

Figura 62 – Largura de banda em função de α_ρ .

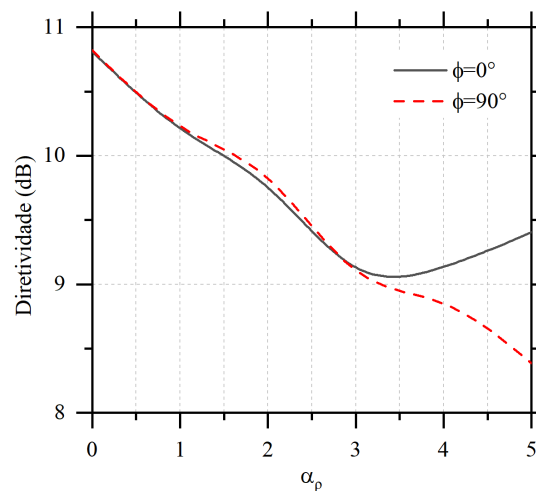
Fonte: Próprio autor.

Figura 63 – Perda de retorno.



Fonte: Próprio autor.

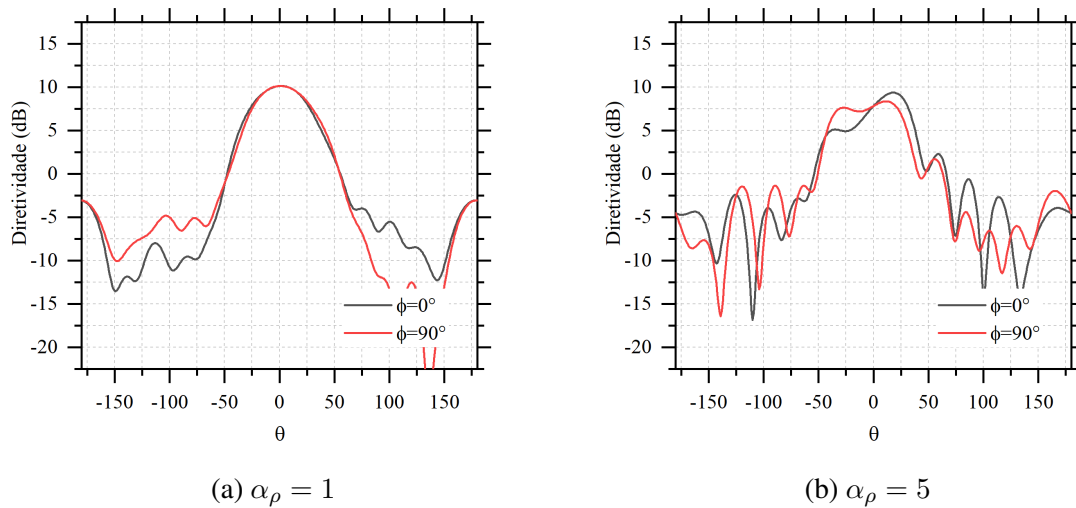
Avaliando a diretividade para este caso, é possível notar que a antena apresenta um desempenho muito inferior em relação à uma antena convencional. Além disso, discrepâncias entre a diretividade em $\phi = 0^\circ$ e $\phi = 90^\circ$ apontam deformidades no diagrama de irradiação de diretividade, conforme a Figura 64.

Figura 64 – Diretividade em função de α_ρ .

Fonte: Próprio autor.

Assim como no caso da antena com raio crescente com $\alpha_\rho \geq 0$, para este caso, a antena apresenta desempenho inferior a uma antena convencional em termos da diretividade, conforme os casos apresentados na Figura 65. Desta forma não se configura como uma configuração interessante para aplicação.

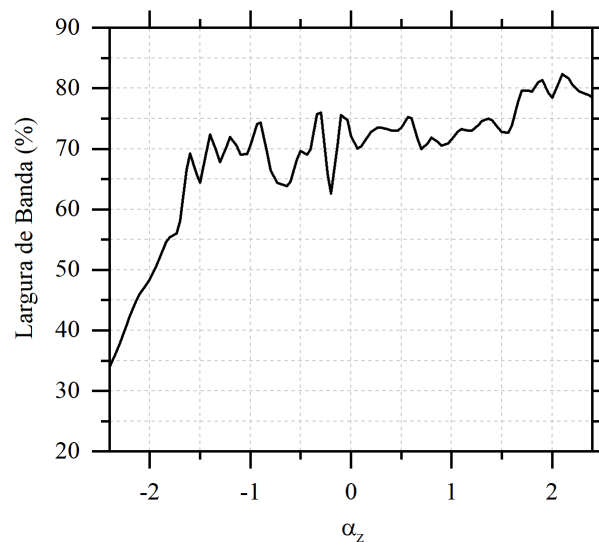
Figura 65 – Diagrama de irradiação da diretividade.



Fonte: Próprio autor.

3.3.0.3 Análise de Antenas Helicoidais Variando-se os Parâmetros α_ρ e α_z

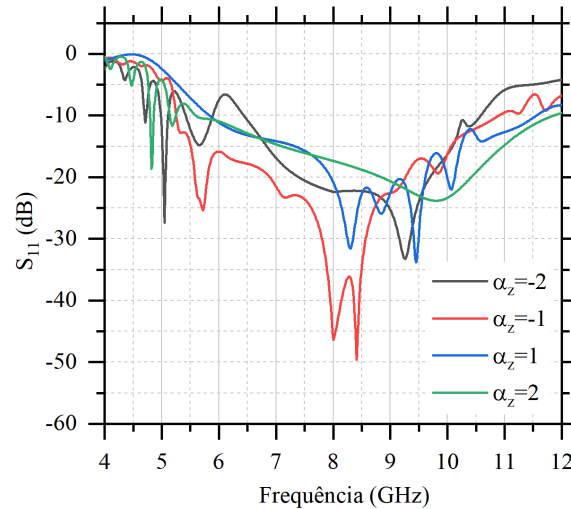
Após a análise da influência dos parâmetros α_ρ e α_z e avaliando o desempenho apresentado nos melhores casos, foi realizada uma análise no software Ansys HFSS de uma antena com α_ρ e α_z não-uniformes. Utilizando uma antena com $\alpha_\rho = -40$, valor no qual há um bom desempenho de largura de banda e diretividade, foi realizada uma análise paramétrica para $-2.4 \leq \alpha_z \leq 2.4$, a fim de verificar o comportamento da antena. Através da Figura 66, observa-se o valor mínimo para a largura de banda quando $\alpha_z = -2.4$. A largura de banda aumenta com o aumento de α_z , atingindo 82,25% quando $\alpha_z = 2.1$.

Figura 66 – Largura de banda em função de α_z .

Fonte: Próprio autor.

A Figura 67 demonstra a perda de retorno para 4 casos de α_z , onde verifica-se o casamento de impedância. Para o caso onde $\alpha_z = -1$, a antena apresenta um excelente casamento de impedância, com a curva centrada em 8 GHz, alcançando níveis inferiores a -40 dB, constituindo esse um bom caso para aplicação, uma vez que também apresenta boa largura de banda.

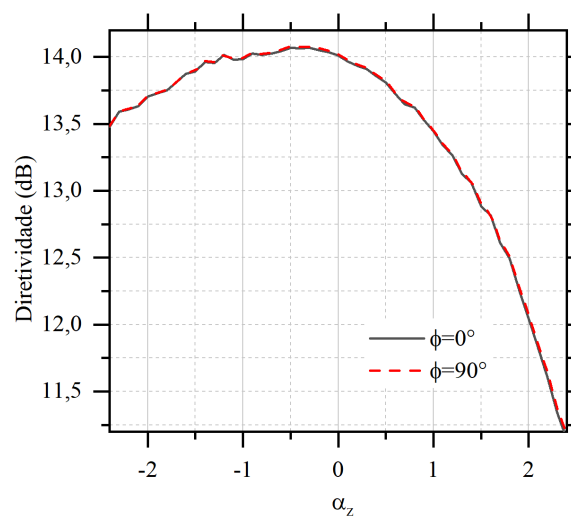
Figura 67 – Perda de retorno.



Fonte: Próprio autor.

Assim como analisado anteriormente, a antena apresenta valores de diretividade superiores a uma antena convencional quando $-1.1 \leq \alpha_z \leq 0$, atingindo seu valor máximo quando $\alpha_z = -0.5$. Apesar do aumento de banda com o aumento de α_z , visto na figura anterior, a diretividade diminui quando $\alpha_z > -0.5$, conforme a Figura 68.

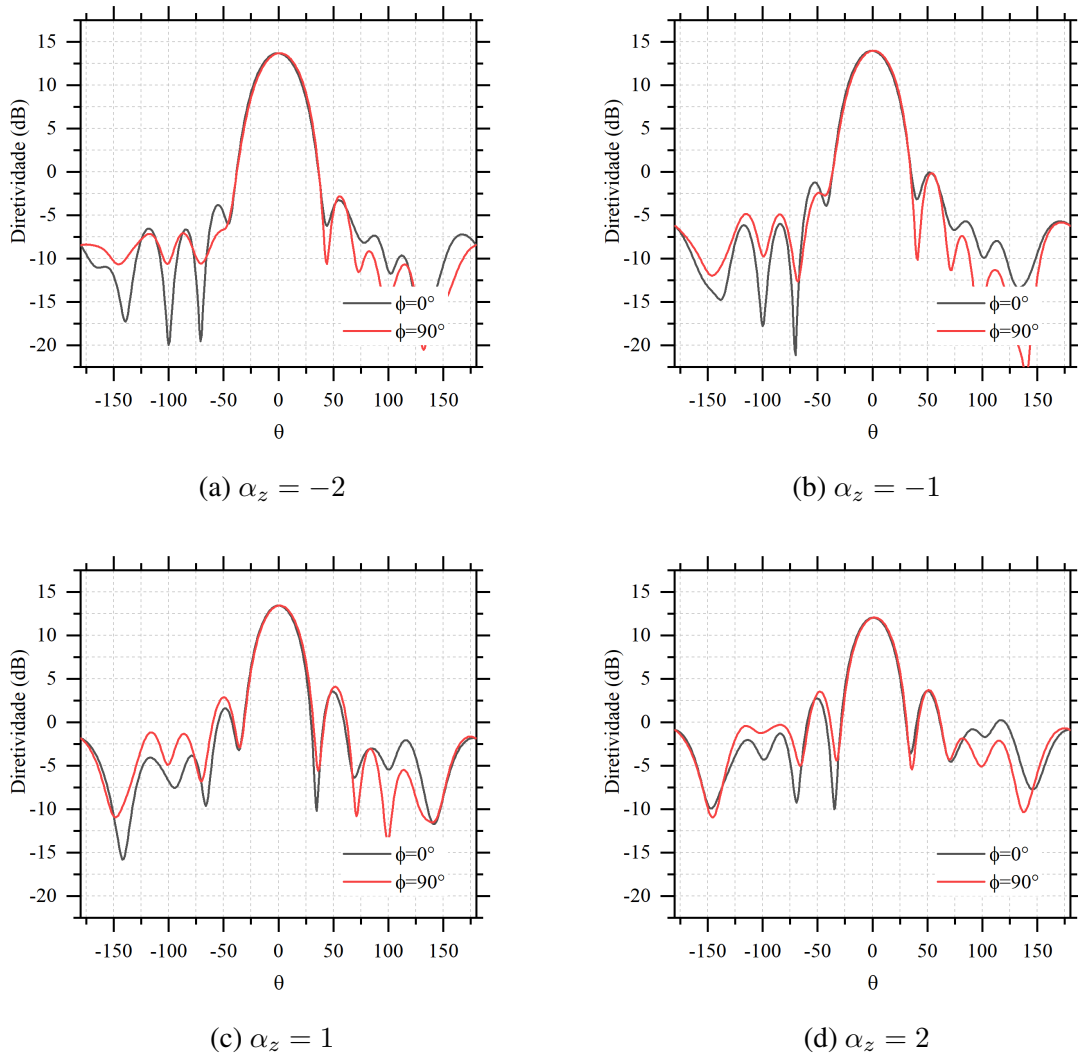
Figura 68 – Diretividade em função de α_z .



Fonte: Próprio autor.

Os diagramas de irradiação da diretividade são apresentados na Figura 69, que indicam a queda na diretividade com o aumento de α_z .

Figura 69 – Diagrama de irradiação da diretividade.



Fonte: Próprio autor.

Tendo em vista os resultados obtidos, observa-se que um aumento na largura de banda de operação, implica em uma queda da diretividade e vice-versa. Ao se construir uma antena baseada nos modelos apresentados, é necessário avaliar o melhor compromisso entre largura de banda e diretividade, a fim de atender os critérios de projeto, objetivando uma otimização da antena.

4 CONCLUSÃO

As antenas helicoidais são antenas de fácil construção e possuem vantagens como operação em banda larga, boa diretividade e podem trabalhar com ondas circularmente polarizadas. Possuem dois modos de operação. No modo normal, ela opera como uma antena omnidirecional, encontrando aplicabilidade em rádios portáteis, por exemplo. No modo axial, ela opera de forma diretiva, sendo aplicada na área aeroespacial, como em satélites e sondas. Essas características demonstram a vasta gama de aplicações que as antenas helicoidais podem encontrar.

Para analisar o desempenho de uma antena convencional, baseada no design desenvolvido inicialmente por Kraus, foi projetado um modelo no software Ansys HFSS para uma operação na Banda X, com frequência central de 8 GHz. Foi possível observar a diretividade e a banda da antena em função de parâmetros como o raio do plano terra, a distância entre a hélice e a base e o número de voltas da hélice. Em alguns casos, é necessário escolher entre uma melhor largura de banda ou uma melhor diretividade, ou então encontrar um ponto ótimo entre esses dois fatores. Também observou-se que é possível reduzir o tamanho de alguns aspectos construtivos, como por exemplo o raio do plano terra, sem afetar o funcionamento da antena. Esse é um fator determinante para redução de peso, dimensões da antena e economia de materiais.

A partir da equação proposta para o desenvolvimento de uma antena helicoidal não-uniforme, foi realizado um estudo das diversas geometrias possíveis de se obter ao se variar os parâmetros α_ρ e α_z . Através das equações propostas, foi possível desenvolver diversos modelos de antenas no software Ansys HFSS, divididas entre as antenas com raio crescente e as antenas com raio decrescente. Observou-se através de análises paramétricas, que a antena com melhor desempenho era obtida através da geometria com raio decrescente, utilizando $\alpha_\rho \leq 0$, onde a largura de banda alcançou níveis superiores, em relação a antena helicoidal convencional, mantendo o mesmo nível de diretividade. Ao se analisar a influência do parâmetro α_z neste caso, foi possível obter uma largura de banda mais elevada, porém em detrimento da diminuição da diretividade. Para critério de projeto, sempre é necessário avaliar o compromisso entre diretividade e largura de banda e assim, aplicar o modelo com os parâmetros desejados.

Desta forma, neste caso, conclui-se que as antenas helicoidais com ângulo de pitch não-uniforme baseadas nas equações propostas, são capazes de fornecer um melhor desempenho em comparação ao modelo de antena helicoidal convencional desenvolvido inicialmente por Kraus.

REFERÊNCIAS

- Balanis, C. **Antenna Theory: Analysis and Design**. John Wiley & Sons, 2005. (Jeff borrow list). ISBN 9780471667827. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=agWwQgAACAAJ>>.
- JAMWAL K K S VAKIL, R. Design analysis of x-band helical antennas. **Indian Journal of Radio & Space Physics (IJRSP)**, v. 15, n. 2, p. 63–65, 1986. ISSN 0975-105X. Disponível em: <<http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/36542>>.
- KNUDSEN, B. et al. Ads-b in space: Decoder implementation and first results from the gatoss mission. In: . [S.l.: s.n.], 2014.
- KRAUS, J.; MARHEFKA, R. **Antennas for All Applications**. McGraw-Hill, 2002. (McGraw-Hill series in electrical engineering). ISBN 9780071232012. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=V6pSPgAACAAJ>>.
- KUMAR, S. S.; MENON, A. M. Nec2 based optimum design of circularly polarized axial mode helical antenna with non-linear pitch profile modeled using catmull-rom spline and particle swarm optimization. **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, v. 5, n. 2, p. 68–72, 2015. ISSN 2249–8958. Disponível em: <<https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v5i2/B4349125215.pdf>>.
- MIMAKI, H.; NAKANO, H. Double pitch helical antenna. In: **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1998 Digest. Antennas: Gateways to the Global Network. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.98CH36)**. [S.l.: s.n.], 1998. v. 4, p. 2320–2323 vol.4.
- RIBEIRO, J. **Engenharia De Antenas: FUNDAMENTOS, PROJETOS E APLICAÇÕES**. ERICA, 2012. ISBN 9788536504100. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=s057MAEACAAJ>>.
- Stutzman, W.; THIELE, G. **Antenna Theory and Design**. Wiley, 2012. (Antenna Theory and Design). ISBN 9780470576649. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=xhZRA1K57wIC>>.
- SULTAN, N. et al. Novel broadband double pitch cylindrical helical antenna for satellite and ground applications. In: **1984 Antennas and Propagation Society International Symposium**. [S.l.: s.n.], 1984. v. 22, p. 162–165.
- TURNER, C. **Northern Utah WebSDR**. Utah Valley Amateur Radio Club, 2019. (The UVARC Shack, 22). Disponível em: <<https://noji.com/hamradio/uvarc/shack/UVARC-Shack-1902.pdf>>.