

DANIEL LIMA LEMES

REDES DE ANTENAS FILAMENTARES INSTALADAS EM VANTS PARA
TELEMETRIA E COMUNICAÇÃO DE DADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Pampa, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Área de Concentração:
Antenas/Telecomunicações

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 2 de julho de 2015.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcos Vinício Thomas Heckler
Orientador



Prof. Me. Edson Rodrigo Schlosser
UNIPAMPA



Prof. Bel. Lucas Santos Pereira
UNIPAMPA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

L314r Lemes, Daniel Lima

Redes de Antenas Filamentares Instaladas em VANTs para
Telemetria e Comunicação de Dados / Daniel Lima Lemes.

57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.

"Orientação: Marcos Vinício Thomas Heckler".

1. Redes de Antenas. 2. Monopolos. 3. Telemetria. 4. VANT.
5. Antenas Filamentares. I. Título.

Daniel Lima Lemes

**Redes de Antenas Filamentares Instaladas em
VANTs para Telemetria e Comunicação de
Dados**

Alegrete, RS

21 de Junho de 2015

Daniel Lima Lemes

Redes de Antenas Filamentares Instaladas em VANTs para Telemetria e Comunicação de Dados

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Antenas/Telecomunicações, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Marcos Vinício Thomas Heckler

Alegrete, RS

21 de Junho de 2015

De coração, quero dedicar esse trabalho à minha família e aos meus amigos por me acompanharem e apoiarem em todos os momentos.

Agradecimentos

”Se cheguei até aqui, foi porque me apoiei no ombro de gigantes”. Utilizando essa frase de Isaac Newton, sem a ironia, quero agradecer a todos que estiveram comigo durante essa jornada me incentivando e, em especial, ao meu orientador Marcos V. T. Heckler que me ajudou durante toda minha graduação.

*"Se quiser ir rápido, vá sozinho.
Se quiser ir longe, vá acompanhado."
(Provérbio Africano)*

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para análise de uma rede de antenas filamentosas instalada em veículos aéreos não tripulados (VANTs). Primeiramente, para se conseguir analisar a rede, um estudo das técnicas disponíveis no software HFSS, em termos de precisão e recursos computacionais é apresentado. De posse disso, conclusões sobre os casos particulares onde uma técnica apresenta melhores resultados que as demais foram obtidas. Após diversas simulações, encontrou-se a posição otimizada para instalação de um monopolo sobre a aeronave, de forma a se obter o melhor diagrama de irradiação para o emprego pretendido. Na segunda parte do trabalho, redes de antenas foram analisadas, uma vez que utilizando somente um elemento não é possível gerar os apontamentos necessários para se ter uma cobertura total com maior ganho. Entende-se por cobertura total quando, independentemente da posição da aeronave em relação à base terrena, o link de comunicação não é desfeito. Além disso, são discutidos métodos para casamento de impedância e um projeto preliminar de alimentador. A metodologia desenvolvida nesse trabalho é genérica o suficiente para ser utilizada em outras aeronaves (VANTs ou aeronaves comerciais). São apresentados os diagramas de irradiação de várias configurações e comentários são realizados a respeito de suas particularidades. Somado a isso, no decorrer do trabalho, são tecidos comentários que explicam o efeito da variação dos parâmetros de uma rede sobre o seu diagrama de irradiação.

Palavras-chave: Rede de Antenas, Monopolos, Telemetria, VANT, Antenas filamentosas.

Abstract

This work presents a methodology for simulating an array of wire antennas installed on unmanned aerial vehicle (UAV). Initially, some techniques available on HFSS that are suitable for the proposal application are discussed in terms of accuracy and computational effort. In the first part of this work, these techniques are used to find the optimum position to install a monopole on the aircraft under analysis, so as to obtain the best performance in terms of radiation pattern. In the second part, the analysis of antenna array installed on the UAV are described in order to achieve full-coverage with larger gain than it is achieved with a single monopole. Full coverage range is meant here when the link never drops independently of the position of airplane. Furthermore, some methods of impedance matching and a preliminary feeder design for the antenna arrays are also discussed. The proposed methodology is detailed and generic enough so that it can be applied to different airplanes (UAVs and commercial aircraft). The radiation patterns are presented in various settings and comments are made. Besides, some comments to explain the effect of varying the parameters of an array of antennas in terms of its radiation patterns are given throughout the work.

Key-words: Antenna arrays, Monopole, Telemetry, UAV, Wire Antennas.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Dimensões elétricas do VANT em estudo.	21
Figura 2 – Modelo CAD da aeronave com superfícies metálicas.	23
Figura 3 – Reflexões com ângulo de incidência de 90°. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>] . .	24
Figura 4 – Reflexões com ângulo de incidência de 50°. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>] . .	24
Figura 5 – Reflexões com ângulo de incidência de 20°. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>] . .	25
Figura 6 – Configuração da aeronave envolta por superfície do tipo ABC.	25
Figura 7 – Perdas por reflexão em função do ângulo de incidência. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>]	26
Figura 8 – Reflexões com ângulo de incidência de 90°. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>] . .	26
Figura 9 – Reflexões com ângulo de incidência de 50°. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>] . .	26
Figura 10 – Reflexões com ângulo de incidência de 20°. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>] . .	27
Figura 11 – Reflexões com ângulo de incidência de 20°. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>] . .	28
Figura 12 – Reflexões com ângulo de incidência de 50°. [Fonte: Manual HFSS 13: <i>Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.</i>] . .	28
Figura 13 – Configuração final da aeronave envolta pelo limite FI-BI.	28
Figura 14 – Configuração da aeronave na aplicação do MoM.	29
Figura 15 – Aplicação do Método Híbrido.	30
Figura 16 – Comparação entre os três métodos, vista superior.	31
Figura 17 – Comparação entre os três métodos, vista frontal.	32
Figura 18 – Malha gerada na aplicação do MoM.	33
Figura 19 – Monopolo instalado no plano de terra	33
Figura 20 – Valores medidos e simulados	34
Figura 21 – Posições escolhidas para possível instalação das antenas no VANT . . .	35
Figura 22 – Diagramas de irradiação nas 5 posições escolhidas.	36
Figura 23 – Diagrama de irradiação correto na posição 2.	37
Figura 24 – Diagramas de Irradiação das cinco posições da vista lateral.	38
Figura 25 – Diagramas de Irradiação das cinco posições da vista frontal.	38
Figura 26 – Esboço dos diferentes casos de <i>beamforming</i>	40

Figura 27 – Esboço da rede instalada sobre a aeronave na posição 3	41
Figura 28 – Diagrama de Irradiação da rede na posição 3	41
Figura 29 – Vista lateral do VANT com a rede instalada na posição 5.	42
Figura 30 – Diagramas de Irradiação da rede de 3 monopolos com diferentes apontamentos instalada na posição 2.	43
Figura 31 – Comparação das redes com três e quatro elementos na posição 5 com apontamentos para $\phi = 90^\circ$ e $\phi = 270^\circ$	44
Figura 32 – Apontamentos da rede com 3 antenas instalada na posição 5.	44
Figura 33 – Apontamentos da rede com 4 antenas instalada na posição 5.	45
Figura 34 – Esboço do divisor de potência.	48
Figura 35 – Comprimento da linha mostrado na Carta de Smith.	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre os métodos em termos de tamanho da malha e tempo de simulação.	32
Tabela 2 – Impedância de entrada das antenas para cada apontamento	46
Tabela 3 – Transformador de $\lambda_g/4$ e comprimento da Linha de Transmissão	49

Sumário

	Introdução	17
1	GEOMETRIA DA AERONAVE E MÉTODOS DE ANÁLISE EMPREGADOS	21
1.1	Diretrizes do Projeto	21
1.2	Modelo Geométrico da Aeronave	22
1.3	Método de Simulação	23
1.3.1	Elementos Finitos	23
1.3.1.1	Condição de Contorno Absorvedora - ABC	24
1.3.1.2	Camada Perfeitamente Casada - PML	25
1.3.1.3	Condição de Contorno Híbrida FE-BI	27
1.3.2	Método dos Momentos	27
1.3.3	Método Híbrido	29
2	ANÁLISE DE UM MONOPOLO INSTALADO SOBRE A AERONAVE	31
2.1	Comparação entre os Métodos de Análise	31
2.2	Comprimento Medido e Simulado do Monopolo	33
2.3	Escolha da Posição para Instalação da Antena	34
3	REDE DE MONOPOLOS INSTALADA SOBRE A AERONAVE	39
3.1	Características da Rede	39
3.2	Projeto do Alimentador	43
	Conclusão	51
	Referências	53

Introdução

Um Veículo Aéreo não Tripulado (VANT), é uma aeronave controlada remotamente ou que realize voos pré-definidos e que não possui a presença do homem. Tais aeronaves são largamente utilizadas para fins militares e, na última década, têm sido introduzidas para fins civis devido às inúmeras aplicações; dentre elas, destacam-se a segurança de eventos e propriedades, aplicações na agricultura de precisão na identificação de pragas com fotografias com filtro infravermelho, monitoramento ambiental, fotogrametria, georreferenciamento, controle de tráfego, desastres naturais e vários outros. Seu uso é defendido principalmente pelo baixo custo de operação, baixa manutenção e baixo risco se comparado com aeronaves convencionais.

Dada a complexidade na construção de um VANT, existe a divisão do mesmo em grandes áreas relacionadas às diversas Engenharias; são elas: Aerodinâmica, Estruturas, Controle/Estabilidade e Eletrônica/Comunicação. A área de comunicação é de vital importância, pois é a partir dela que se fará possível realizar a comunicação entre aeronave e base, podendo-se, assim, monitorar parâmetros importantes para o voo e realizar correções necessárias para o sucesso da missão.

O cerne da área de comunicação são as antenas. Segundo (IEEE, 1969) "Antenas são dispositivos utilizados para receber ou transmitir sinais de rádio-frequência através da conversão de ondas eletromagnéticas em sinais elétricos". (HECKLER, 2015) complementa essa definição ao dizer que tratam-se também de filtros espaciais. Dentro desse contexto, o presente trabalho desenvolve uma metodologia para a implementação de antenas do tipo filamentar em VANTs. A metodologia foi desenvolvida para aplicações em distintas aeronaves, ou seja, foram abordados parâmetros genéricos e, para validá-la, o trabalho baseou-se em simulações realizadas para um determinado VANT.

O presente estudo foi conduzido através da análise das características de irradiação das antenas em um simulador eletromagnético considerando-se uma aeronave com superfície metálica. Além das antenas, algumas considerações sobre o alimentador são tecidas. Para modelar o diagrama de irradiação de maneira conveniente, uma rede de antenas foi criada e a quantidade, posição na aeronave e correntes entregues serão frutos de estudos nesse trabalho e posteriores conclusões. A frequência a ser utilizada no projeto é de 5,8 GHz, que corresponde a uma das faixas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Tal frequência foi escolhida por ser liberada para as aplicações citadas sem necessidade de autorização da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

A aeronave utilizada advém do grupo AEROPAMPA, que tem por finalidade projetar e construir VANTs para participar da competição internacional *SAE Aerodesign*

e posteriormente embarcar equipamentos para realização de monitoramentos e pesquisas acadêmicas. Essa aeronave foi projetada para carregar 10 kg, decolar em até 61 metros de pista e possuir área, em vista superior, de $0,7 m^2$. É melhor pontuado também, o projeto que obtiver a menor razão de peso do avião por carga paga. Essas limitações geram algumas peculiaridades estruturais que não são vistas em aeronaves comerciais. Porém, o intuito é, além de fomentar conhecimento aeronáutico no país, desenvolver novas soluções para que no futuro sejam aplicadas aos aviões de tamanho real.

Normalmente, em aviões comerciais, utiliza-se somente um monopolo para realizar uma das comunicações necessárias e, como citado anteriormente, nesse projeto foi desenvolvida uma rede de antenas. Essa diferença deve-se ao fato de que no presente projeto, utiliza-se somente uma antena base, ao contrário de um voo comercial. Assim, para que o link de comunicação esteja sempre ativo, é necessário modificar o apontamento do diagrama da rede para compensar as mudanças de direção da aeronave. Aliado a isso, em uma rede de antenas é possível aumentar o ganho em uma dada direção, incrementando assim, a distância que o avião poderá ter em relação à antena da base.

O material condutor utilizado para o VANT deve atender tanto critérios mecânicos como eletromagnéticos. Materiais aeronáuticos são fruto de pesquisa constante para aumentar a resistência e diminuir o peso. A fibra de Grafite é um dos materiais mais utilizados, pois, além de ser utilizado puro, é também matéria-prima para materiais compósitos. Os autores (NGAI; EAPEN; NEWMAN, 2004) analisaram os diagramas de irradiação de uma antena do tipo *blade* instalada em uma aeronave composta por fibra de grafite e concluíram que essa fibra pode ser modelada como material condutor. Tal característica atende ao requisito de condutividade desejado para a presente aplicação.

Para atingir uma boa irradiação omnidirecional, os autores (RAHARDJO FITRI YULI ZULKIFLI; SUMANTYO, 2013) construíram uma rede com 4 elementos irradiadores construídos em microfita. Tais antenas são bastante utilizadas no ramo da aeronáutica pois, não comprometem a aerodinâmica da aeronave. A fim de evitar as perdas por descasamento de polarização, os autores optaram pela utilização da polarização circular. Os elementos são dispostos em forma circular, atestando, assim, a grande importância da localização das antenas na aeronave.

Sabe-se que o custo envolvido para medição dos parâmetros em uma aeronave em voo é muito alto. Também existem parâmetros que não podem ser medidos por limitações físicas. Em (HECKLER; DREHER, 2012), uma análise dessas dificuldades é tecida e comparações entre resultados simulados e medidos são feitas. Essas comparações são base para validar as simulações realizadas em softwares comerciais. Esse artigo também valida uma metodologia para obtenção de resultados precisos de antenas instaladas em aeronaves convencionais, englobando a realização de medições em aeronaves em escala e, simultaneamente, aumentando a frequência de operação para manter as mesmas dimensões

elétricas (em comprimentos de onda) da estrutura. Esses resultados reforçam a importância da metodologia que será construída nesse trabalho, pois amplia sua utilização para aeronaves convencionais.

Em (HECKLER; DREHER, 2006), uma comparação entre o MLFMM (*Multi-level fast multipole method*) e PO (*Physical optics*) é feita para otimizar o tempo e a precisão das simulações em softwares comerciais. O Método dos Elementos Finitos possui ótima precisão, porém para aeronaves com a parte metálica muito grande, torna-se impraticável a sua aplicação devido ao tempo de simulação. Assim, chega-se à conclusão de que esse método pode ser utilizado em modelos em escala e VANTs, e, para antenas colocadas próximo a áreas onde ocorrem múltiplas reflexões, o método MLFMM é mais indicado. O método PO é indicado para elementos irradiadores postos em áreas que possuem múltiplas reflexões de baixa intensidade, pois somente nessa condição o método possui uma boa precisão.

Sabe-se, também, que o sistema de comunicação necessita operar em distintas frequências para receber, por exemplo, sinal de GPS e comunicar com a estação no solo. O artigo (CHEN; WANG, 2013) sugere a criação de uma antena dupla-faixa do tipo espiral.

Ainda na escolha do tipo de antena, (LEE; KIM, 2004) compara quatro tipos de antenas para sistemas de colisão que operam em 30 GHz. Chega-se a conclusão que, para pequenos VANTs, as antenas parabólicas são as melhores, pois possuem dimensões compatíveis com a aeronave, evitando o comprometimento da aerodinâmica.

Um dos pontos chave desse trabalho está na conformação do feixe da antena transmissora para aumentar o alcance do sistema. Sendo assim, a escolha da posição de cada elemento na aeronave é de fundamental importância. Os autores de (HUANG; GENG, 2011) utilizaram o método dos momentos para analisar o acoplamento mútuo entre as antenas e propõem um algoritmo. Para minimizar esse efeito, duas antenas são posicionadas no VANT e as coordenadas da terceira são obtidas através do algoritmo.

Através dessas pesquisas bibliográficas, foi possível extrair ideias e dados para a construção do presente projeto. Trata-se do estudo da influência das partes de uma aeronave no diagrama de irradiação de uma rede de antenas, otimização do posicionamento dos elementos irradiadores, comparação de diferentes métodos de simulação, desenvolvimento dos divisores de potência e casadores em microfitas e determinar a distribuição de potência e fase entre as antenas para o apontamento em três distintas direções, a fim de atingir toda a cobertura necessária para que o link de comunicação nunca seja desfeito.

Na próxima seção, detalha-se o trabalho e apresenta-se as diretrizes que o guiarão. Logo em seguida, são apresentados resultados e comentários acerca dos métodos de simulação. Escolhe-se, então, a posição da rede na aeronave, o projeto do alimentador é apresentado e, por último, a conclusão sobre todo o trabalho desenvolvido.

1 Geometria da Aeronave e Métodos de Análise Empregados

1.1 Diretrizes do Projeto

Como citado na introdução, um dos sistemas mais importantes do VANT é a telemetria, e, por ser impossível a conexão via cabo, faz-se necessária a utilização de antenas para transmissão e recepção dos dados. A complexidade do projeto está em encontrar o diagrama de irradiação das antenas embarcadas e, por se tratar de uma geometria complexa e muito grande em comparação ao comprimento de onda λ , a simulação se torna muito demorada e requer a utilização de um computador de alto desempenho. Na Fig. 1 é possível ver as dimensões elétricas do VANT.

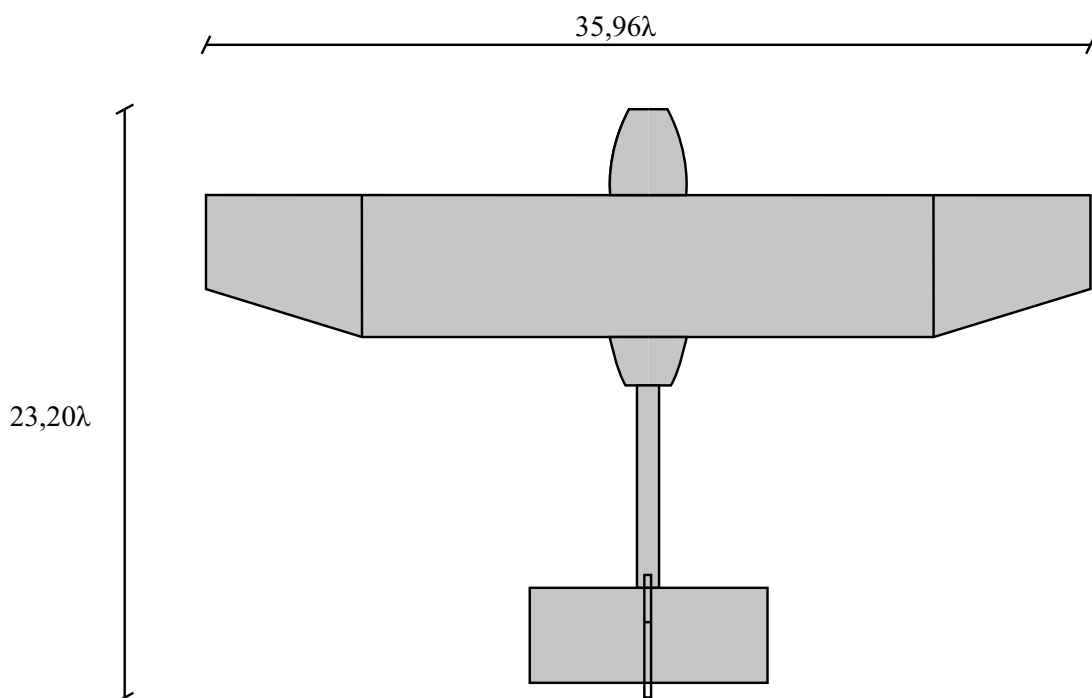


Fig. 1 – Dimensões elétricas do VANT em estudo.

Onde R é a distância para se ter o campo distante, D é a maior dimensão do elemento e λ_0 o comprimento de onda.

Um dos objetivos desse trabalho é analisar esses fatores limitantes e gerar informações suficientes para nortear as futuras simulações. Assim, diferentes métodos de simulação serão comparados nos próximos capítulos e discorrer-se-á a respeito deles de forma a deixar claro o porquê da escolha de um método em detrimento dos outros. Além disso, analisam-se também todas as decisões tomadas para alcançar os objetivos abaixo:

- Cobertura total em todas as direções de apontamento;
- Pequeno arrasto aerodinâmico;
- Baixo peso;
- Robustez.

1.2 Modelo Geométrico da Aeronave

Como citado anteriormente, obter o diagrama de irradiação e, por consequência, todos os parâmetros necessários para qualificar uma rede de antenas instalada sobre uma aeronave real é um processo caro e praticamente inviável dependendo da frequência de operação. Para exemplificar, utilizando a equação (1.1) nota-se que, para o VANT em análise nesse trabalho, seria necessária uma câmara anecoica com 135,67 metros de comprimento para medir o diagrama em campo distante. Tal análise comprova a necessidade da utilização de simulações para otimizar a rede de antenas. Apesar de muito precisas, as simulações não se sobrepõem à necessidade da realização de testes em campo. No entanto, como o processo de otimização demanda várias modificações de parâmetros, para economizar recursos e tempo, pode-se fazê-lo através de simulações.

$$R = (2D^2)/\lambda \quad (1.1)$$

O software utilizado para realizar as simulações é o HFSS (ANSYS HFSS USERS' GUIDE VERSION 15.0, 2015). O HFSS é um software comercial para simulação 3-D de campos eletromagnéticos. Sua precisão é muito boa e a Universidade onde esse trabalho foi desenvolvido possui licença. No entanto, suas ferramentas para desenho são limitadas.

O modelo geométrico da aeronave (*CAD-Computer Aided Design*) é muito complexo, pois existe a presença de curvas que são difíceis de parametrizar como, por exemplo, os perfis aerodinâmicos. Assim, utilizou-se o software (SOLID WORKS,) para fazer os desenhos que posteriormente foram importados para o HFSS através do formato ".step". O resultado pode ser visto na Fig. 2.

Depois de importado para o HFSS, faz-se necessário atribuir a cada parte do CAD o material a ser utilizado e também realizar a correção de alguns erros de posicionamento. Esses erros são gerados porque o HFSS não permite a sobreposição de elementos mas, utilizando a ferramenta *boolean*, é possível corrigi-los.

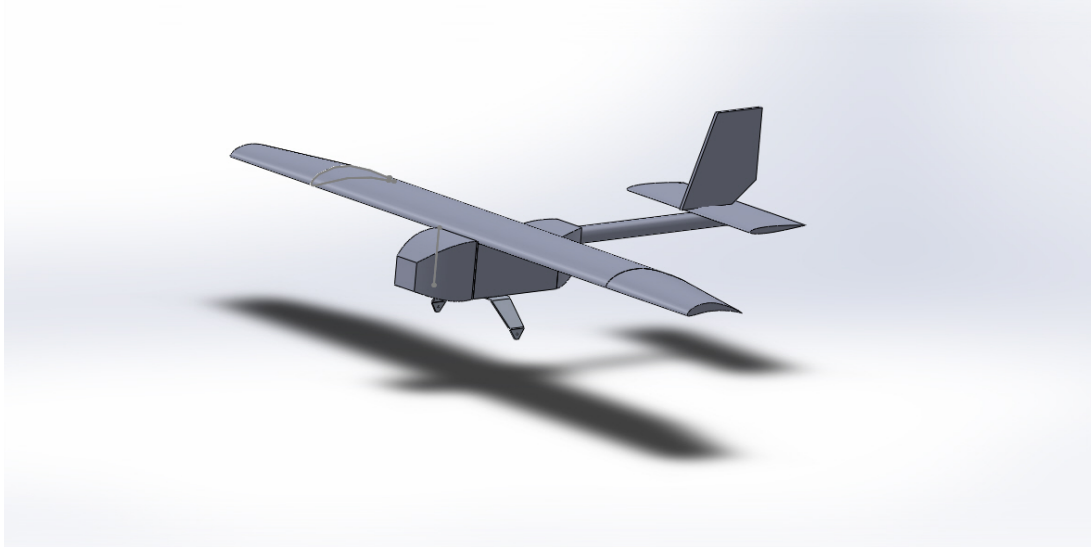


Fig. 2 – Modelo CAD da aeronave com superfícies metálicas.

1.3 Método de Simulação

Quando se envolvem materiais não homogêneos e com superfícies complexas, a resolução analítica dos problemas se torna impossível. Assim, surgem os métodos numéricos, cuja função é resolver por iterações de modo a obter uma aproximação compatível com o comportamento real dos campos. Dentre outras classificações, os métodos numéricos podem ser divididos em duas grandes áreas: Métodos que resolvem equações integrais e métodos que utilizam equações diferenciais. O mais conhecido método com integrais é o Método dos Momentos. Esse método é de difícil aplicação em objetos complexos e requer uma enorme quantidade de memória. Já dentro dos métodos com equações diferenciais, o Método dos Elementos Finitos é o mais utilizado.

O diagrama de irradiação de uma antena é obtido através da equação integral (1.2). Para um monopolo instalado em uma aeronave, não existe solução analítica que descreva o campo eletromagnético irradiado. Por isso, para encontrar $U(\theta, \phi)$, que é função da corrente no monopolo, faz-se necessária a utilização de um método numérico. Diante disso, o HFSS possui diferentes métodos numéricos: o Método dos Momentos, Elementos Finitos e o Método Híbrido.

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (1.2)$$

1.3.1 Elementos Finitos

Neste método, o elemento ou espaço a ser resolvido é dividido em pequenas partes que são analisadas separadamente e depois as soluções individuais são unidas de forma a obter a solução geral. Para isso, são utilizadas inúmeras formas geométricas para subdividir

o espaço, sendo a mais usual o tetraedro. Por isso, a escolha da superfície para truncamento do domínio computacional é muito importante, pois se essa for muito grande gerará muitos elementos e, por consequência acarretará em uso excessivo de memória. Se for muito pequena, no caso de problemas de irradiação, o diagrama de irradiação não será corretamente calculado. Reflexões geradas pelo incorreto dimensionamento da superfície interferem na simulação, gerando resultados inexatos.

No Ansys HFSS existem três tipos de condições de contorno laterais que podem ser utilizadas; São elas: ABC (*Absorbing Boundary Condition*), PML (*Perfectly Matched Layer*), FE-BI (*Finite Element-Boundary Integral*). O objetivo de todos esses artifícios é simular o espaço livre infinito, ou seja, permitir ao programa calcular o diagrama de irradiação sem que apareçam reflexões.

1.3.1.1 Condição de Contorno Absorvedora - ABC

A condição de contorno absorvedora imita, através de equações matemáticas, a continuação da propagação de uma onda além do limite. Assim, quando a onda incide sobre a ABC, os campos são fortemente atenuados. A principal desvantagem dessa técnica é que a eficácia dessas equações depende do ângulo de incidência da onda sobre a ABC.

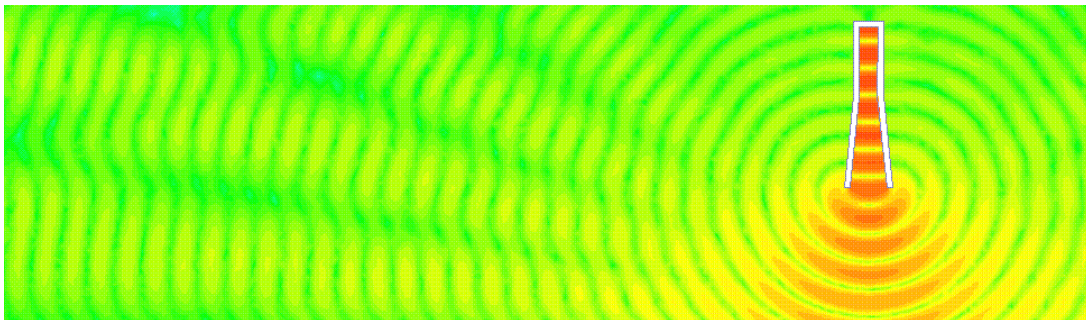


Fig. 3 – Reflexões com ângulo de incidência de 90° . [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

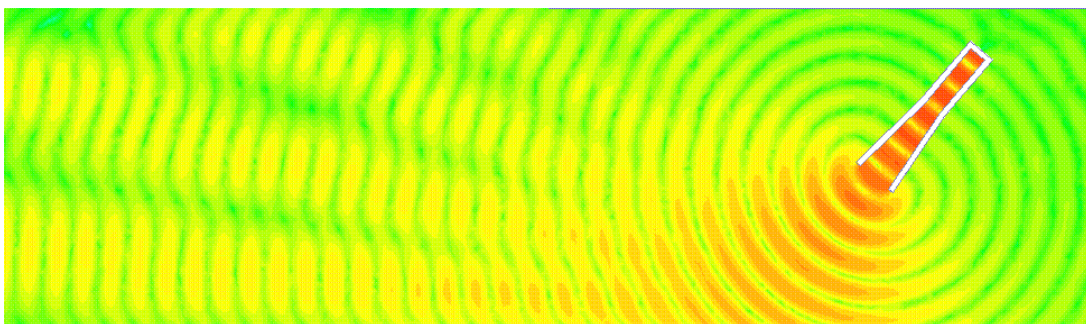


Fig. 4 – Reflexões com ângulo de incidência de 50° . [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

É possível notar tal dependência nas Figs. 3 a 5. Por isso, a caixa que delimita o domínio computacional com ABC não deve possuir idealmente ângulos internos convexos.

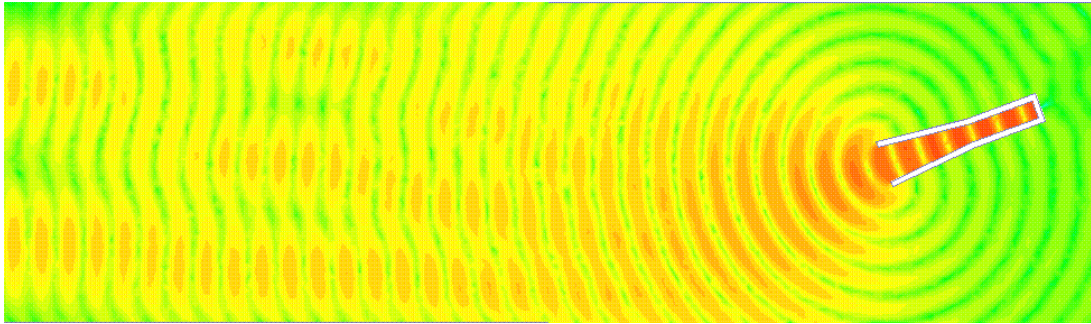


Fig. 5 – Reflexões com ângulo de incidência de 20°. [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

Além disso, recomenda-se que a ABC seja colocada a uma distância de no mínimo $\lambda_0/4$ do elemento irradiador na direção de maior irradiação. Essas características são responsáveis por criar um espaço muito grande onde o método deverá ser aplicado, aumentando assim o tempo de simulação.

A configuração final da aplicação do método no projeto pode ser vista na Fig. 6.

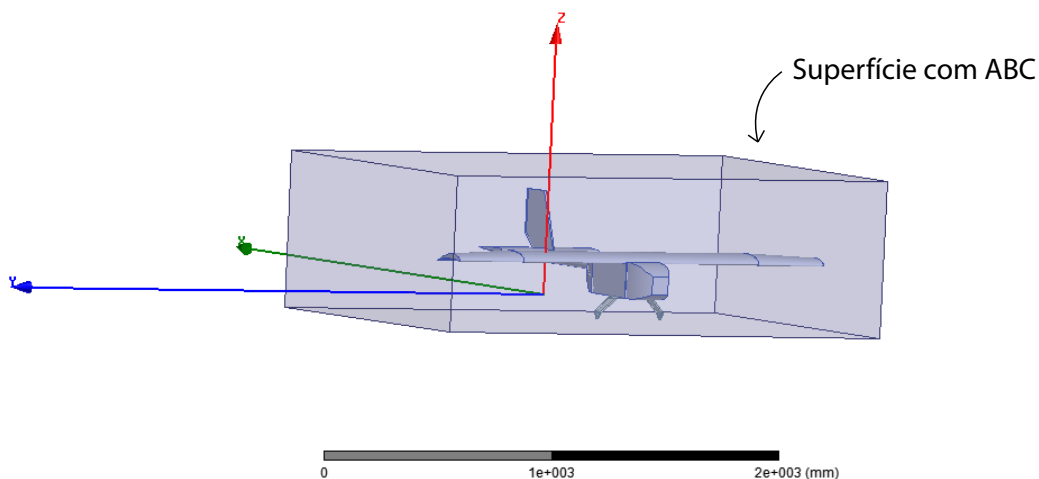


Fig. 6 – Configuração da aeronave envolta por superfície do tipo ABC.

A fig. 7 mostra de maneira completa o comportamento do coeficiente de reflexão em relação ao ângulo de incidência da onda, onde um ângulo zero representa o caso de incidência normal.

1.3.1.2 Camada Perfeitamente Casada - PML

A PML advém do termo inglês *perfectly matched layer*. Nesta configuração, o software simula um material anisotrópico que absorve o campo eletromagnético com, aproximadamente, reflexão nula da onda incidente. A eficácia desse material depende da espessura dele. Porém, ao aumentar sua espessura, aumenta-se o domínio computacional e, por consequência, o tempo de simulação. O coeficiente de reflexão é maior que -20 dB para ângulos acima de 70 graus; assim, recomenda-se esse método para revestimento de

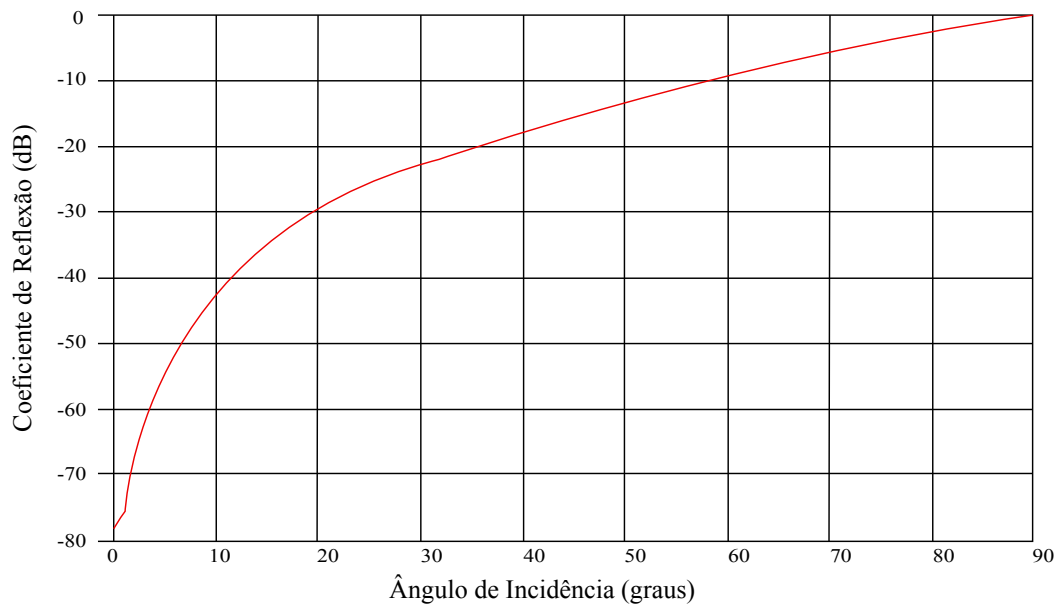


Fig. 7 – Perdas por reflexão em função do ângulo de incidência. [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

superfícies limites planas. É possível verificar a exatidão do método nas Figs. 8 a 10 e gerar uma comparação com a ABC, uma vez que reflexões não são observadas nos gráficos.

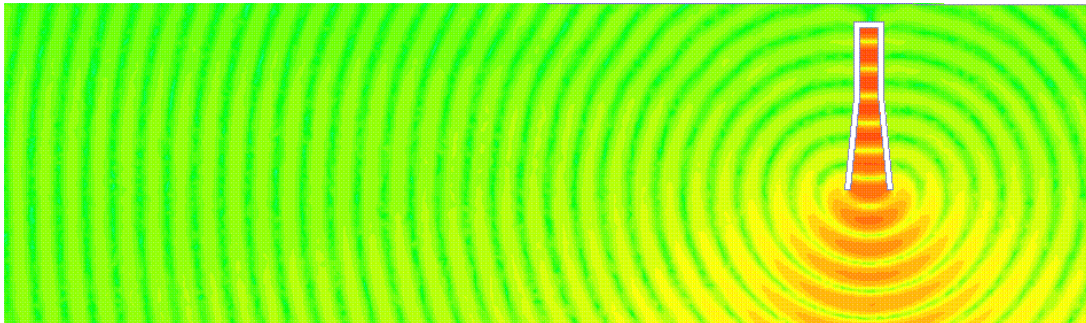


Fig. 8 – Reflexões com ângulo de incidência de 90°. [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

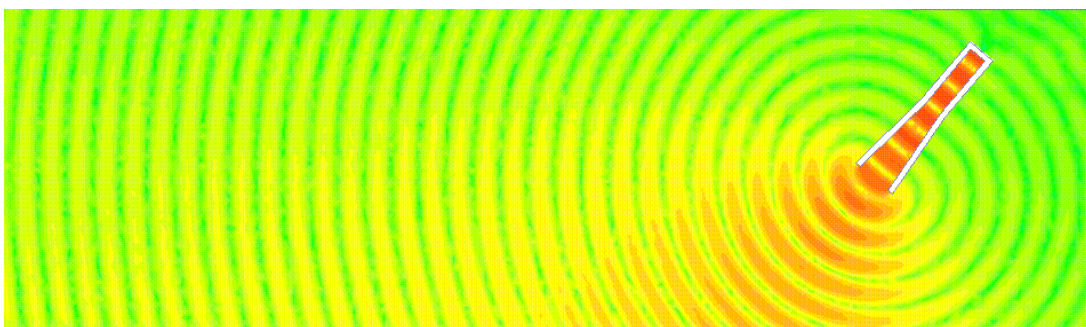


Fig. 9 – Reflexões com ângulo de incidência de 50°. [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

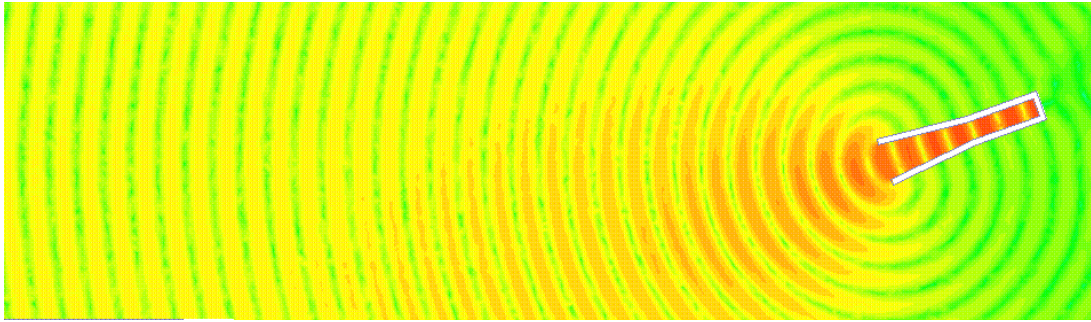


Fig. 10 – Reflexões com ângulo de incidência de 20° . [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

1.3.1.3 Condição de Contorno Híbrida FE-BI

Essa técnica consiste em unir as melhores características do Método dos Elementos Finitos e do Método dos Momentos. Através de iterações, o software calcula o campo dentro da caixa com o FEM e, quando o campo atinge a superfície limite, aplica-se a equação integral para calcular um fator de correção que é aplicado ao FEM novamente para recalculá-lo, evitando-se assim, a reflexão. Como se trata de uma superfície simples, o MoM gera uma malha com elementos grandes, diminuindo-se assim, o tempo de simulação.

Essa configuração de cálculo apresenta inúmeras vantagens em comparação aos outros métodos; dentre elas se destacam:

- Não existe a necessidade de uma distância mínima em relação aos elementos irradiadores, diminuindo-se assim, o domínio computacional para o FEM;
- A absorção dos campos incidentes independe do ângulo;
- Devido à característica anterior, o formato da caixa que engloba o domínio computacional pode conter ângulos internos convexos;
- Requer 7,5 vezes menos esforço computacional se comparado com o PML (ANSYS, 2014);

Na Fig. 13, nota-se a diminuição considerável do volume interno da caixa se comparado com paredes ABC, o que impacta positivamente no tempo de simulação.

1.3.2 Método dos Momentos

Ao contrário do FEM, este método utiliza equações integrais para obtenção das densidades de corrente induzidas na superfície metálica e é tido como método exato. No entanto, como sua resolução gera matrizes cheias, a quantidade de memória computacional requerida é muito grande. Assim, ele deve ser aplicado em superfícies pouco complexas que

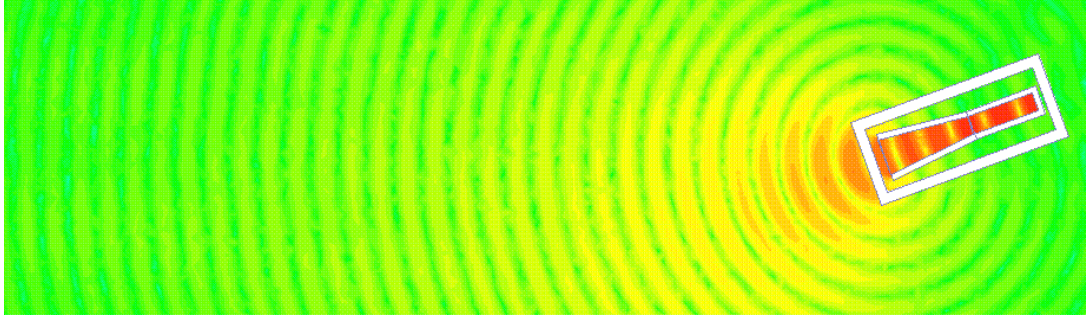


Fig. 11 – Reflexões com ângulo de incidência de 20° . [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

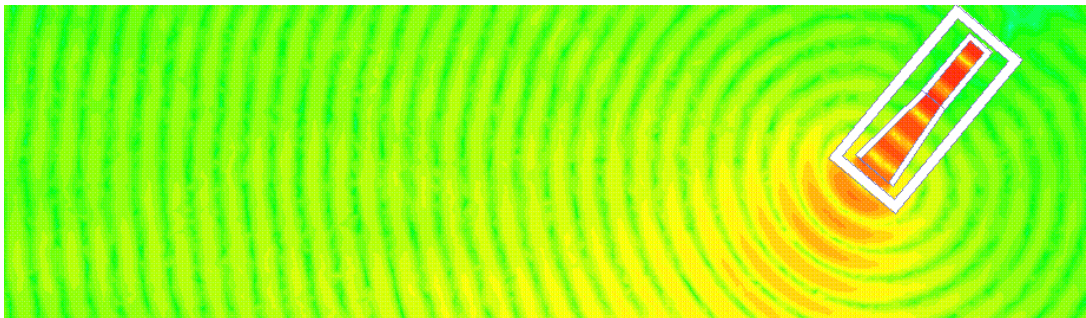


Fig. 12 – Reflexões com ângulo de incidência de 50° . [Fonte: Manual HFSS 13: *Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of Radiation and Scattering.*]

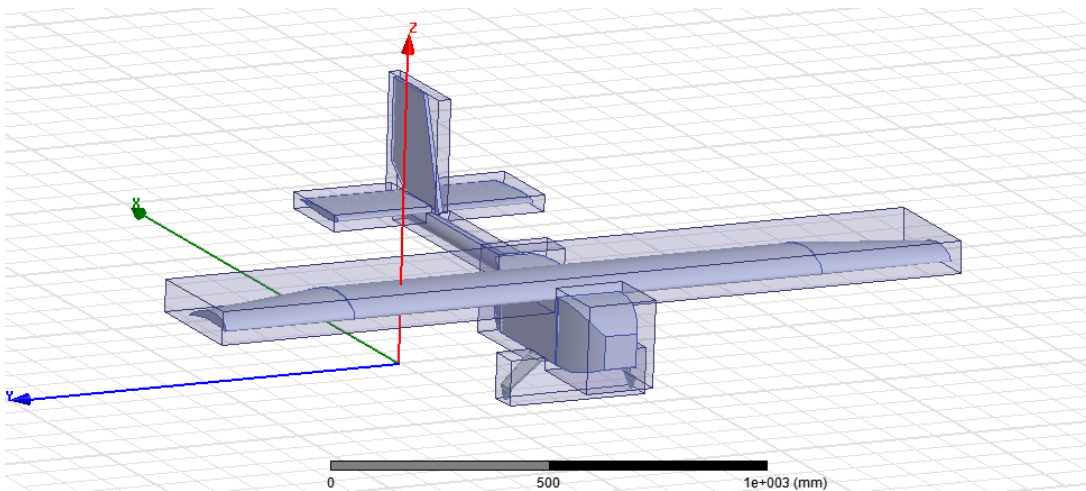


Fig. 13 – Configuração final da aeronave envolta pelo limite FI-BI.

gerem poucos elementos, ou para objetos que não são eletricamente grandes em relação ao comprimento de onda. Nesse trabalho, como será visto no capítulo 2, não foi viável a utilização desse método, pois as dimensões da aeronave em relação à frequência de operação não satisfazem as condições citadas anteriormente. Além disso, a superfície é muito complexa, gerando assim muitos elementos.

Para utilização do MoM, a geometria da aeronave é mostrada na Fig. 14. Neste caso, não há necessidade de se envolver a aeronave com uma caixa para truncamento do

domínio computacional, pois esse método discretiza a superfície e não o espaço. O campo distante irradiado é obtido posteriormente com a utilização da função de Green do espaço livre.

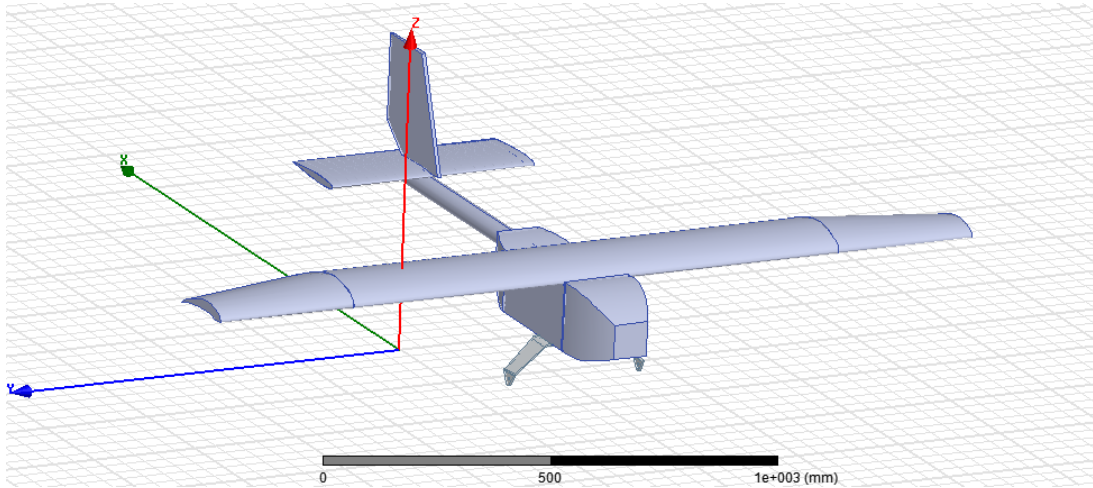


Fig. 14 – Configuração da aeronave na aplicação do MoM.

1.3.3 Método Híbrido

Apesar de o FEM com o limite FE-BI ser híbrido, este método é mais comumente denominado assim porque existe uma clara divisão dos domínios onde cada método será utilizado. Como dito anteriormente, o MoM aplica-se para superfícies metálicas e, para o caso de uma antena alimentada por ponta de prova coaxial, existem elementos dielétricos que devem ser modelados por FEM. Para isso, cria-se uma caixa limite pequena em volta dos elementos irradiadores onde se utilizará o FEM e, no restante da aeronave, aplica-se o MoM.

A aplicação desse método na aeronave é ilustrada na Fig. 15 e, como pode ser visto, a caixa limite é bem pequena e somente envolve a antena.

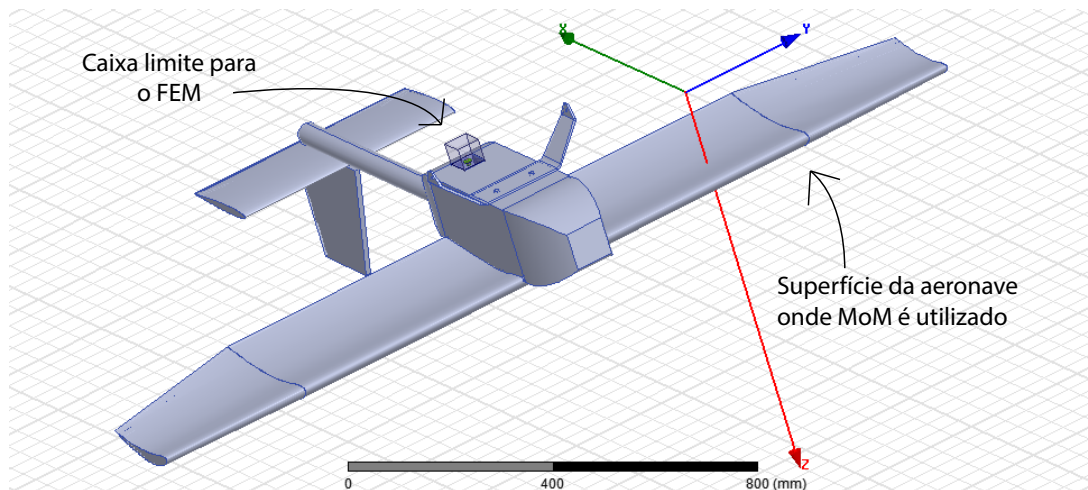


Fig. 15 – Aplicação do Método Híbrido.

2 Análise de um Monopolo Instalado sobre a Aeronave

2.1 Comparação entre os Métodos de Análise

Para escolher o método a ser utilizado, simulou-se uma antena instalada sobre a aeronave, em uma dada posição, com os 4 métodos. Essa posição pode ser vista na Fig. 15. O resultado obtido é ilustrado na Fig. 16 e mostra que, em termos gerais, a discrepância gerada é mínima. Tomando como base esse resultado, comprova-se que independentemente do método escolhido, a exatidão dos resultados será a mesma.

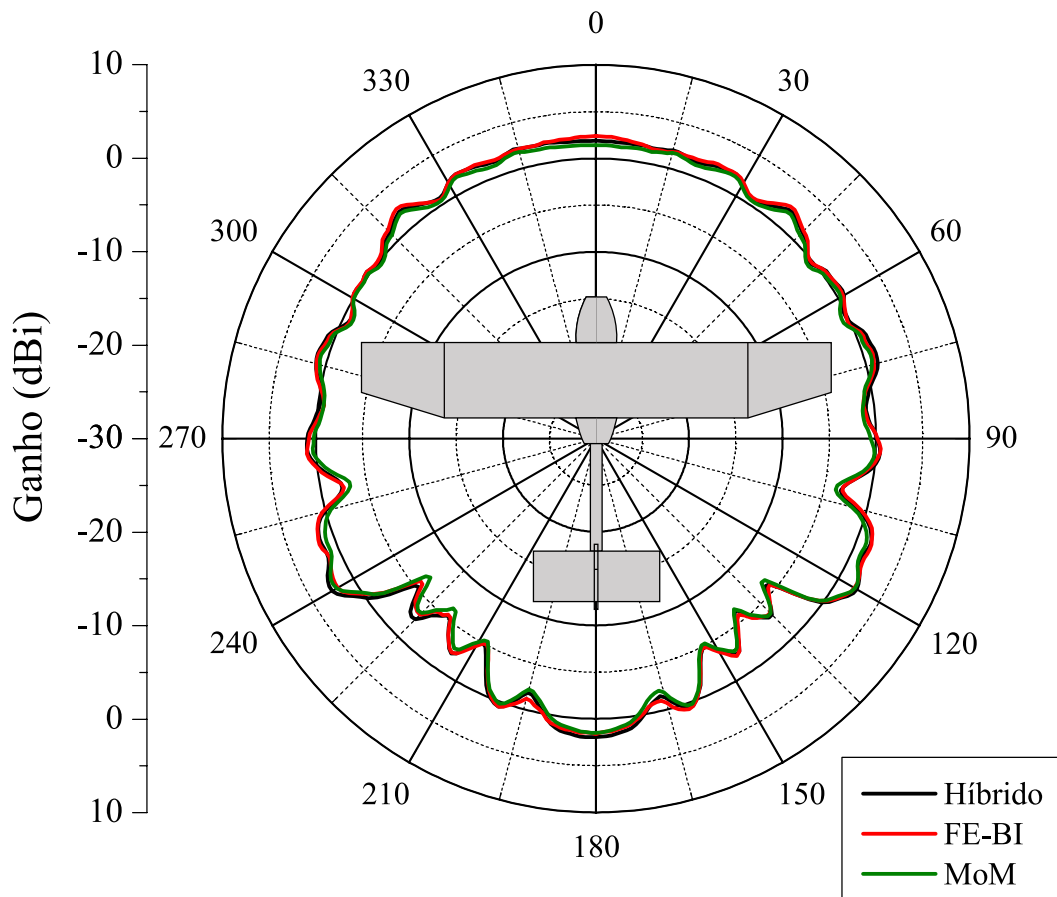


Fig. 16 – Comparação entre os três métodos, vista superior.

Para reforçar a eficiência de todos os métodos, mostram-se ainda os diagramas de irradiação com um outro plano. A Fig. 17 reforça que todos os três métodos podem ser utilizados.

Nota-se a ausência do método FEM com paredes ABC nos diagramas. Isso se deve ao fato da simulação não ter convergido nessa configuração. Após 41 horas, utilizando-se uma

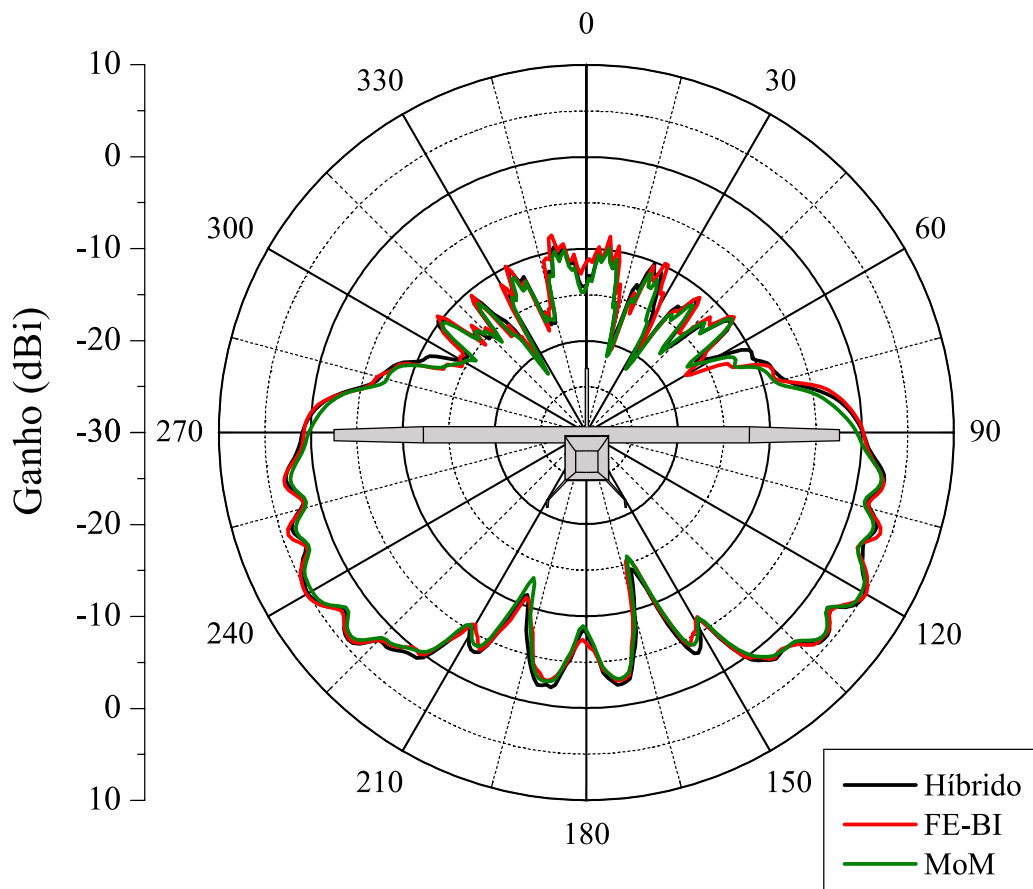


Fig. 17 – Comparação entre os três métodos, vista frontal.

Método	Número de Elementos	Tempo de Simulação
Elementos Finitos (ABC)	Não convergiu	Não convergiu
Elementos Finitos (HFSS-IE)	166874 tetraedros	05:09:58
Híbrido	88303 tetraedros	24:45:50
Método dos Momentos	155126 triângulos	18:19:23

Tabela 1 – Comparação entre os métodos em termos de tamanho da malha e tempo de simulação.

workstation com 32 núcleos e 128 GB de memória RAM, a simulação ainda se encontrava no primeiro passo do processo inicial de geração de malha.

Além da exatidão dos resultados, também é importante saber qual a demanda computacional exigida por cada técnica. Quando se observa a Tabela 1, chega-se à conclusão de que a melhor configuração para esse projeto é o FE-BI, pois resultou em uma simulação quatro vezes menor que com o MoM, o *setup* de configuração no HFSS é pouco complexo e, além disso, requer um esforço computacional 7,5 vezes menor.

Obviamente, como citado anteriormente, esperava-se que o MoM fosse o que dispensaria menor tempo de simulação. Isso não se concretizou devido à alta complexidade das superfícies e ao fato de o tamanho elétrico da estrutura ser muito maior que o

comprimento de onda, gerando assim uma malha com demasiados elementos. Essa malha pode ser vista em detalhes na Fig. 18, onde verifica-se a existência de uma quantidade muito grande de elementos no encontro das superfícies e nos perfis aerodinâmicos por se tratarem de locais complexos de discretizar.

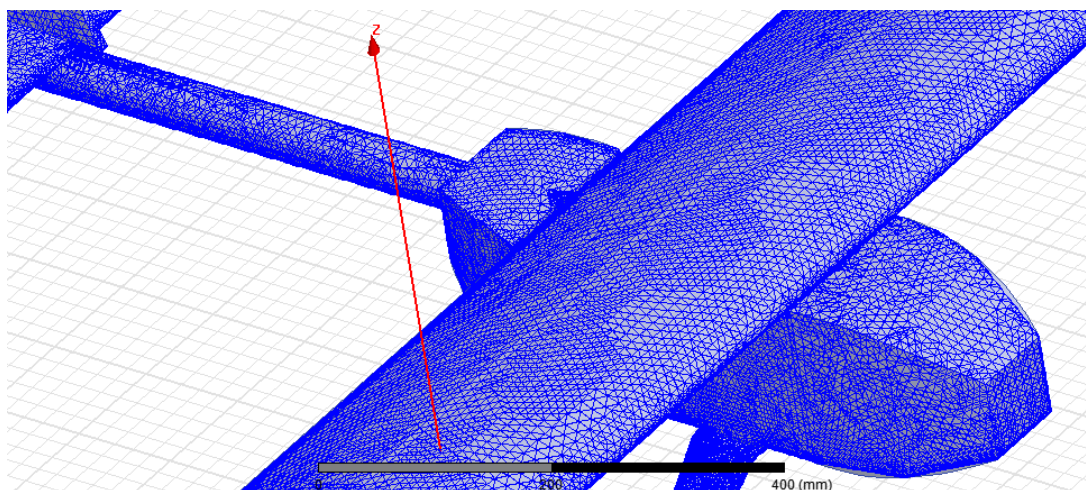


Fig. 18 – Malha gerada na aplicação do MoM.

2.2 Comprimento Medido e Simulado do Monopolo

Para validar o comprimento do monopolo, construiu-se um *setup* para realizar as medições em bancada. Essa configuração pode ser vista na Fig. 19 e trata-se de um plano de terra feito em alumínio com o monopolo posicionado no centro. Assim, foi possível comparar os valores obtidos na prática com os simulados. Em bancada obteve-se 11,1 mm e em simulação 11,65 mm para o comprimento do monopolo, uma diferença de 0,55 mm. No entanto, o deslocamento de frequência observado na Fig. 20 é mínimo e aceitável, validando assim todos os resultados obtidos, através das simulações, e descritos no decorrer dos capítulos.



Figura 19 – Monopolo instalado no plano de terra

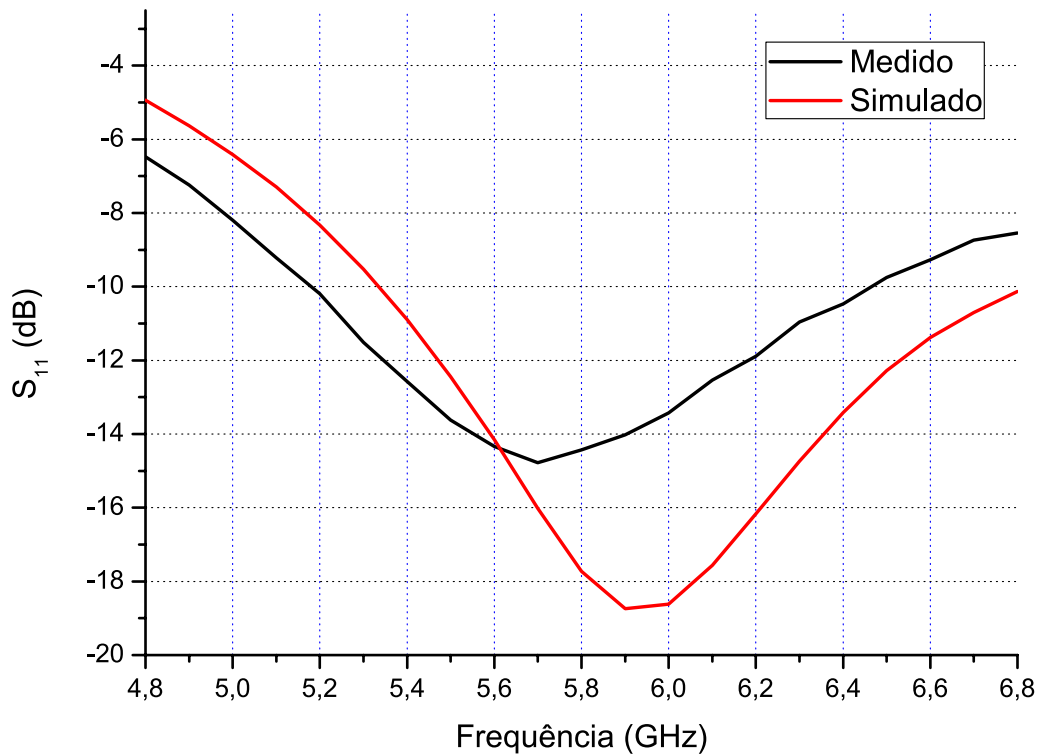


Fig. 20 – Valores medidos e simulados

2.3 Escolha da Posição para Instalação da Antena

Como todo projeto de engenharia, esse passo requer uma análise minuciosa que, por sua vez, está atrelada a um *tradeoff*, ou seja, é necessário maximizar os ganhos "eletromagnéticos" e minimizar as perdas aerodinâmicas e mecânicas.

Como se deseja comunicar com a base durante o voo, as antenas deverão ser alocadas na parte inferior da aeronave. Atrelado a isso, um dos quesitos importantes para um voo regular é a simetria em relação ao eixo de rolamento e, por isso, a rede de antenas deverá permanecer nesse eixo. Chega-se à conclusão de que só é possível alocá-las na fuselagem ou no *boom* (tubo responsável pela ligação da fuselagem à empenagem), como mostrado na Fig. 21. Escolheram-se, então, cinco posições para realizar as simulações. O corte de vista superior é o mais importante, pois quanto mais distante a aeronave está da antena base, mais a irradiação nesse plano se torna relevante. Assim, na maioria das vezes, analisou-se com maior profundidade o diagrama de irradiação nesse corte.

Em um primeiro momento, os diagramas ilustrados na Fig. 22 foram obtidos. É possível notar que na posição 2 o diagrama é exatamente o que se espera de um monopolo, ou seja, um diagrama omnidirecional e sem ondulações. A justificativa desse resultado seria, que dada a posição, a distância do elemento irradiador às bordas da fuselagem é simétrica e relativamente grande. Porém para atestar a veracidade desse diagrama, refez-se a simulação e constatou-se um erro de software. Esse erro provavelmente foi um erro

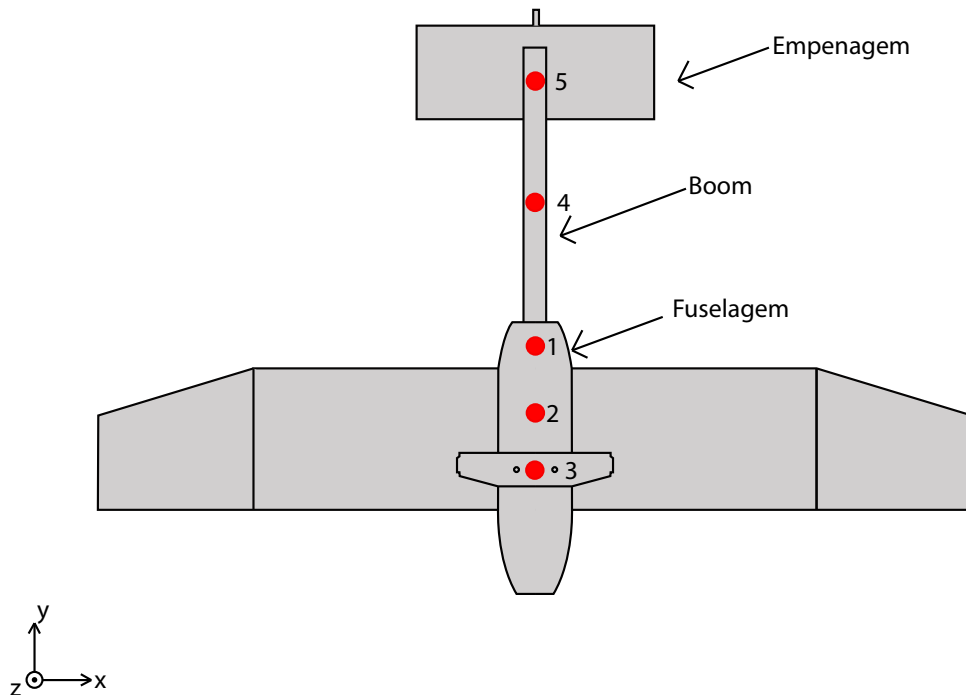


Fig. 21 – Posições escolhidas para possível instalação das antenas no VANT

numérico e o novo resultado pode ser visualizado na Fig. 23.

Em (KOUYOUMIAN; PATHAK, 1974), encontra-se a explicação para essa irregularidade denominada "franjas" nos diagramas. Baseado na Teoria de Difração Geométrica de Keller, nota-se que essa peculiaridade é gerada nas bordas das superfícies onde existe a difração de borda. A onda incidente é refletida com ângulos diferentes e a soma vetorial dessas ondas com a onda irradiada de forma direta pela antena formam ora um padrão construtivo, ora destrutivo. Além disso, esse artigo também calcula um coeficiente que prevê esse fenômeno, mas sua análise matemática, dada a complexidade, foge do escopo desse trabalho.

Apesar de o plano $\theta = 90^\circ$ ser mais importante, como citado anteriormente, uma análise dos outros cortes foi feita e constatou-se a presença de inúmeros nulos e pontos de mínimos que são gerados pelas múltiplas reflexões e falta de simetria da complexa superfície. Essas características podem ser visualizadas nas Figs. 24 e 25.

Com o auxílio dos diagramas, as posições que possuem melhores características de irradiação são as posições 2 e 5. No entanto, optou-se por simular a rede também na posição três pois existe o estreitamento no diagrama nas direções de 90° e 270° e, por consequência, um aumento do ganho nas demais direções. Em termos práticos essa peculiaridade geraria uma área onde não haveria cobertura e, por isso, a comunicação entre a aeronave e a base seria comprometida. Porém, como se trata de um sistema de telemetria e a aeronave estaria nessa posição durante poucos segundos, caso o aumento

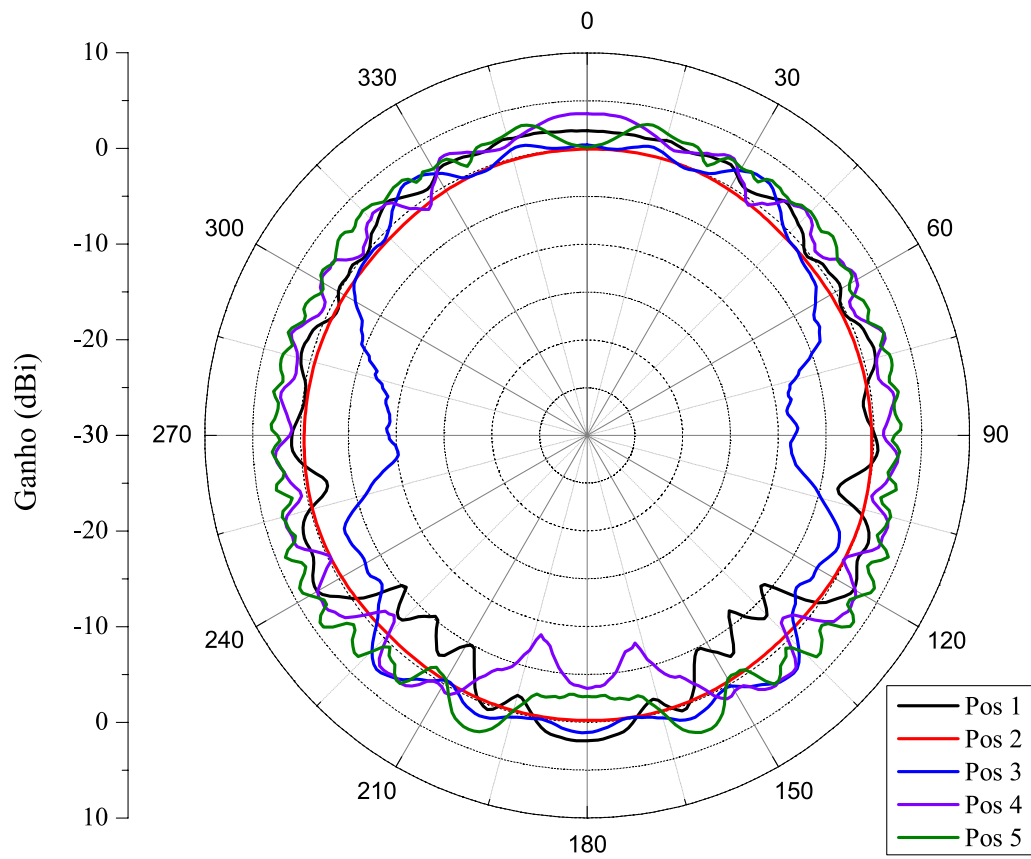


Fig. 22 – Diagramas de irradiação nas 5 posições escolhidas.

de ganho fosse muito significativo nas outras direções, essa posição seria a melhor. Daí a justificativa de ainda se considerar essa posição.

Levando em consideração todas as características encontradas nos diagramas, a melhor posição para instalar o monopolo é a posição 5. A diminuição do ganho que aparece em torno da direção $\theta = 180^\circ$, devido à presença da fuselagem, pode ser compensada com a rede.

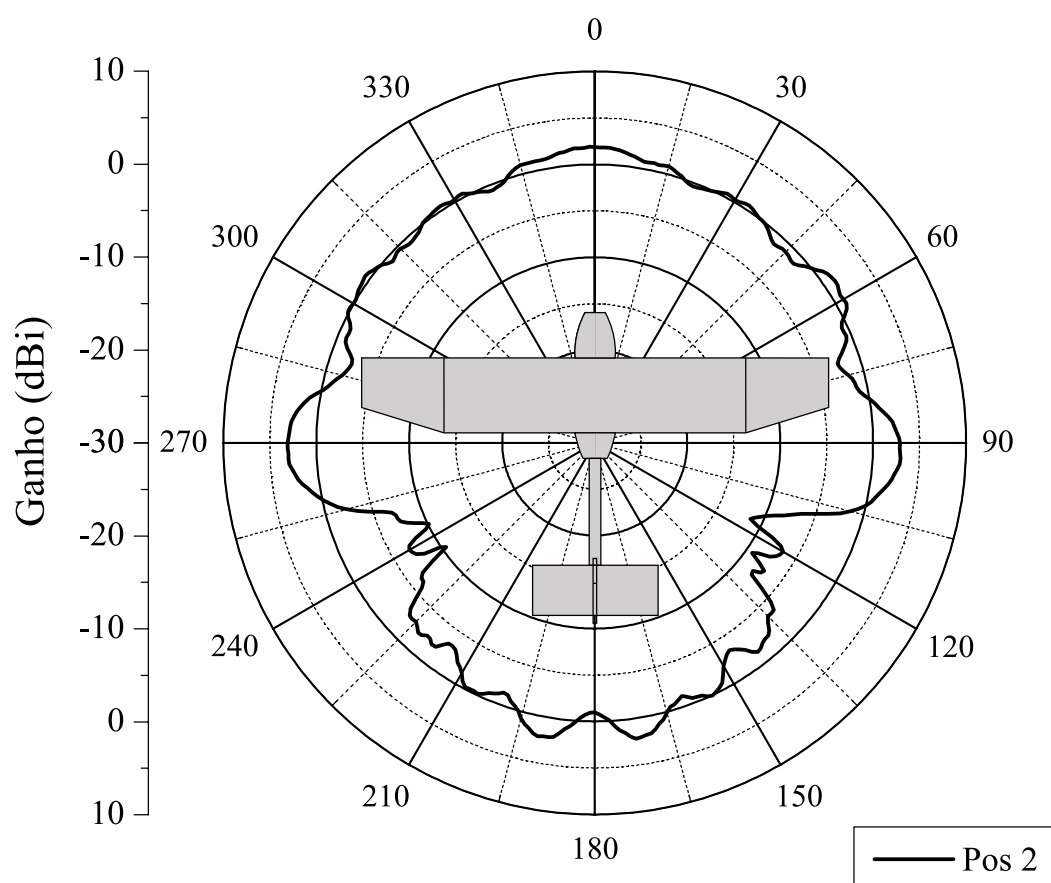


Fig. 23 – Diagrama de irradiação correto na posição 2.

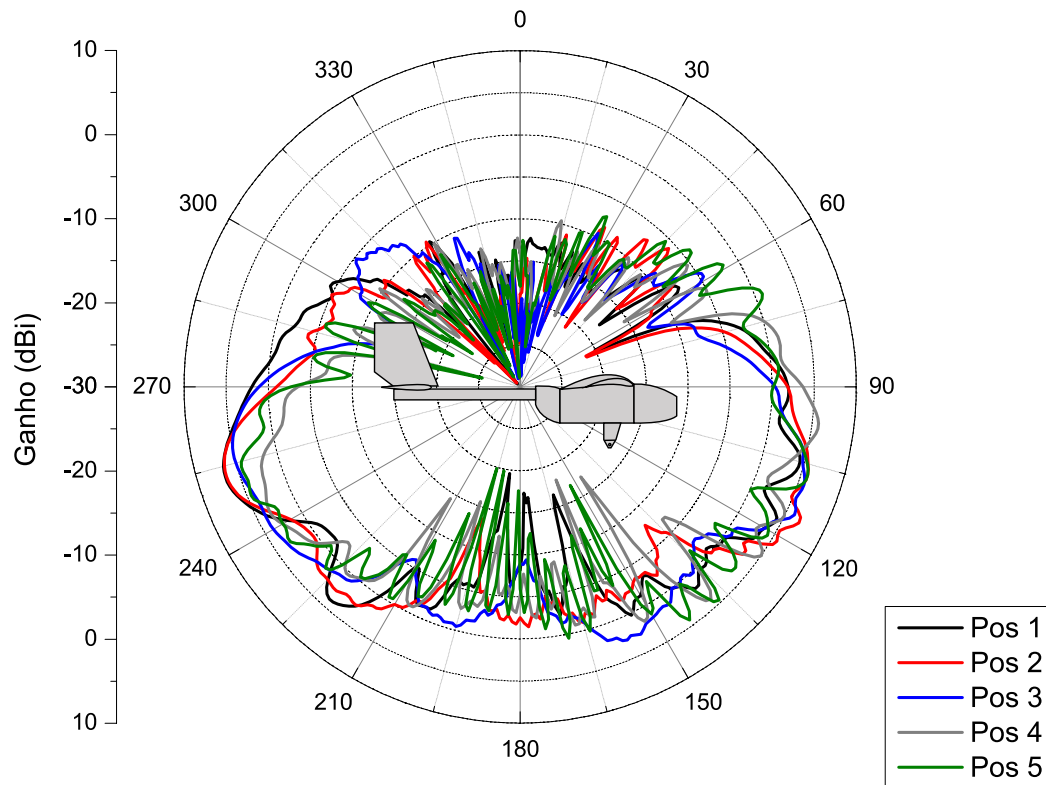


Fig. 24 – Diagramas de Irradiação das cinco posições da vista lateral.

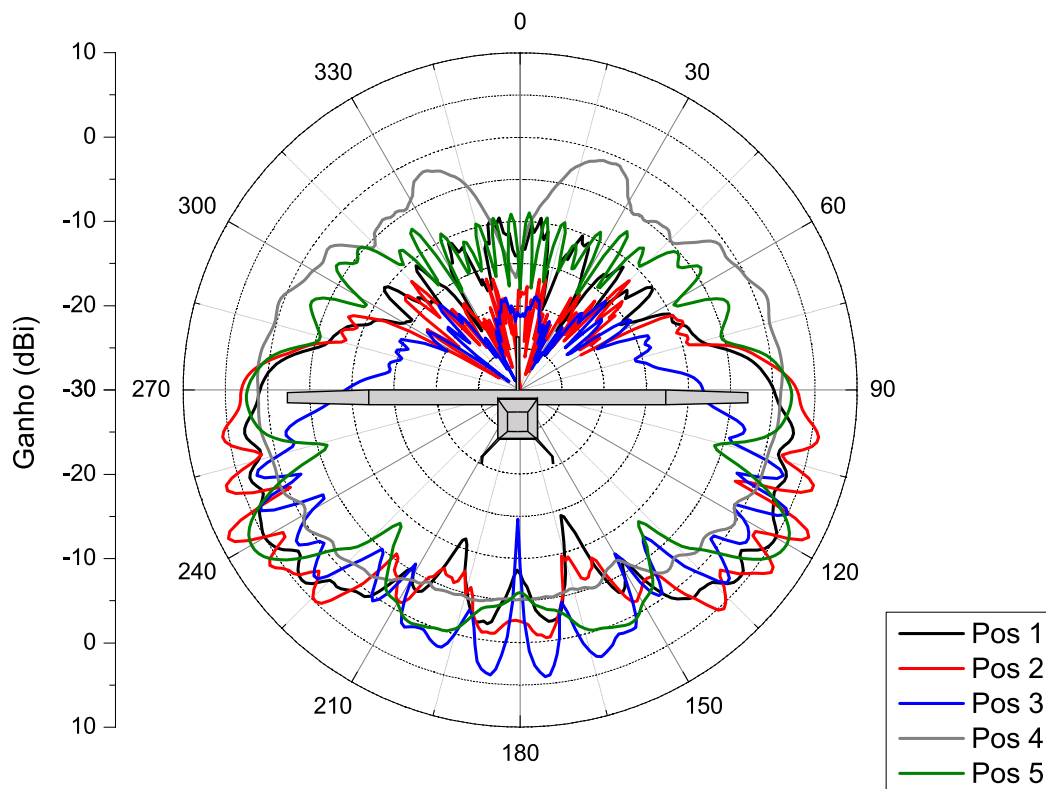


Fig. 25 – Diagramas de Irradiação das cinco posições da vista frontal.

3 Rede de Monopolos Instalada sobre a Aeronave

3.1 Características da Rede

Durante o voo, a posição da aeronave em relação à base terrena varia no decorrer do tempo. Assim, para que as informações referentes à telemetria da aeronave sempre cheguem à base, faz-se necessário obter um diagrama de irradiação omnidirecional. Antenas que satisfazem essa condição são os monopolos analisados no capítulo anterior. Tais irradiadores possuem baixo ganho, tornando necessária a utilização de alta potência para estabelecimento do *link* de comunicação a grandes distâncias entre aeronave e base terrena.

Com o intuito de reduzir a potência irradiada mantendo-se o mesmo alcance, antenas com maior ganho devem ser utilizadas. Uma vez que a aerodinâmica não pode ser fortemente afetada pela antena de telemetria, a escolha da geometria irradiadora a ser adotada deve ser realizada com cuidado. Uma vez que o arrasto aerodinâmico de antenas do tipo monopolo é baixo, optou-se pelo emprego de redes de monopolos instaladas sobre a superfície da aeronave.

Uma rede de antenas tem cinco graus de liberdade; são eles: geometria do elemento irradiador, espaçamento entre os elementos, geometria da rede, amplitude e a fase da corrente em cada antena (BALANIS, 2005). Todos eles têm impacto direto no diagrama de irradiação. A geometria de menor complexidade e que já permite o apontamento desejado é o monopolo, por isso foi a escolhida. Além disso, optou-se por fixar a distância entre eles em $\lambda_0/2$, pois quanto mais próximo de λ_0 for essa distância mais nulos aparecerão no diagrama e quanto mais próximo de 0, menor será o efeito do fator de rede, restando, assim, dois parâmetros para serem variados.

A mudança nas amplitude das correntes entregues às antenas é responsável pelo controle dos lóbulos secundários e por conformar o lóbulo principal. No entanto, a variação desse parâmetro aumenta exponencialmente a complexidade do sistema de alimentação, o que, devido ao tempo de execução, fica impraticável desenvolver nesse trabalho.

Ao contrário da amplitude, a fase, nesse tipo de rede, é responsável pelo apontamento do lóbulo principal. Esse apontamento segue a equação (3.1), onde para o apontamento de máxima irradiação, a variável ψ deve ser zero. Para alcançar a cobertura necessária, analisaram-se três posições para redes de 3 e 4 elementos. Como é notório na equação, os ângulos de defasagem progressiva das correntes independem da quantidade de elementos, por isso, substituindo os valores de d e k , continuam valendo os valores para defasagem progressiva β , 180° para o diagrama *end-fire*, 0° para o *broadside* e $121,27^\circ$ para o apontamento

em 45° .

$$\psi = kdcos(\theta + \beta) \quad (3.1)$$

Onde k é a constante de propagação no ar, d é a distância entre os elementos adjacentes, β o ângulo de defasagem progressiva da corrente nos elementos e θ o ângulo de apontamento.

A Fig. 26 ilustra os diferentes casos de *beamforming* adotados para cobertura de todo o espaço. Permitindo, assim, que o *link* de comunicação nunca seja desfeito, independentemente da trajetória adotada pela aeronave.

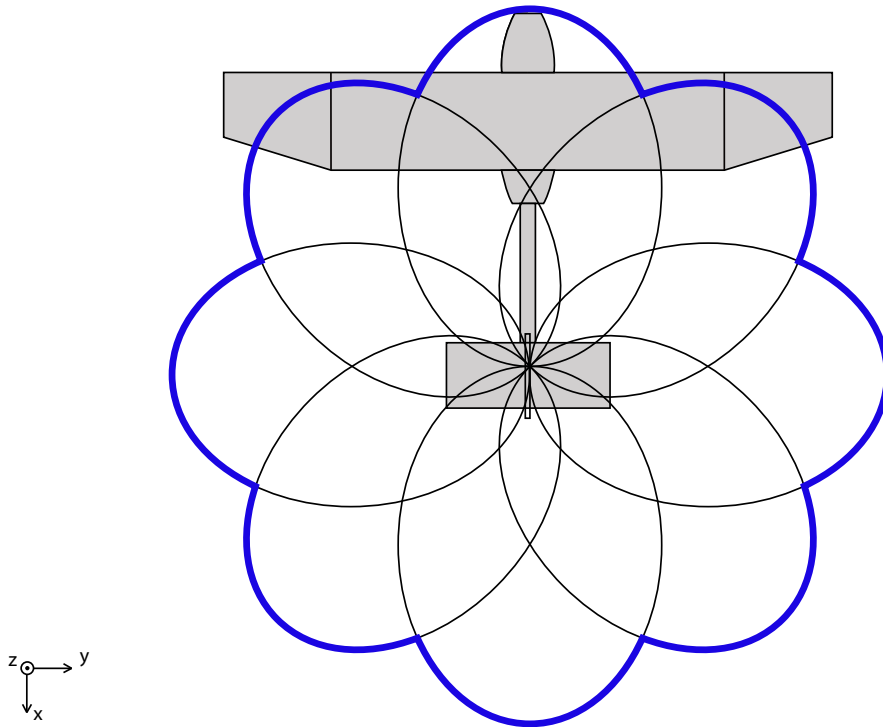


Fig. 26 – Esboço dos diferentes casos de *beamforming*

A Fig. 27 mostra a rede de três elementos instalada na posição 3. O diagrama de irradiação nessa posição, considerando-se 3 e 4 monopolos, está ilustrado na Fig. 28 para o caso de as redes operarem com característica *broadside*. Descartar essa posição se torna fácil ao analisar o ganho e a falta de um lóbulo principal, que era esperado nas direções $\phi = 90^\circ$ e $\phi = 270^\circ$. Mas para fins acadêmicos, analisar essa posição foi de grande valia pois mostra que a presença de elementos metálicos que impedem a antena de irradiar na sua direção principal (*broadside*), em um primeiro momento parece vantajoso mas para uma rede com esses elementos, essa característica traz um efeito negativo.

Assim, a escolha da posição ótima para instalação da rede pautou-se nas posições 2 e 5 (ver Fig. 21). Do ponto de vista de fixação e peso de cauda, seria muito desinteressante

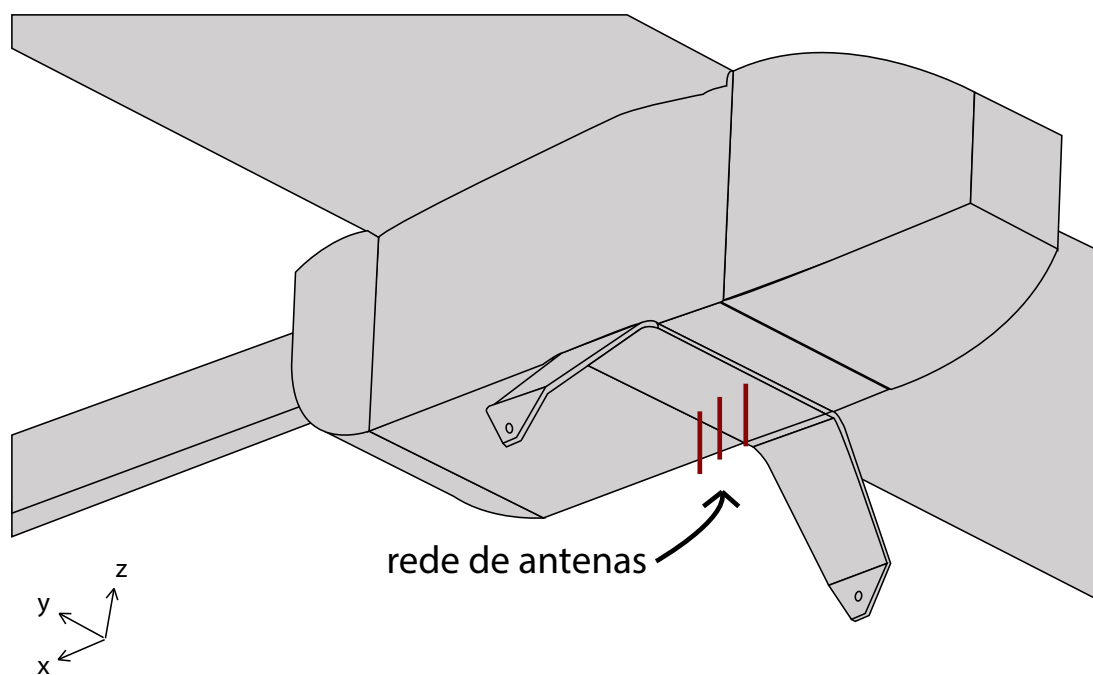


Fig. 27 – Esboço da rede instalada sobre a aeronave na posição 3

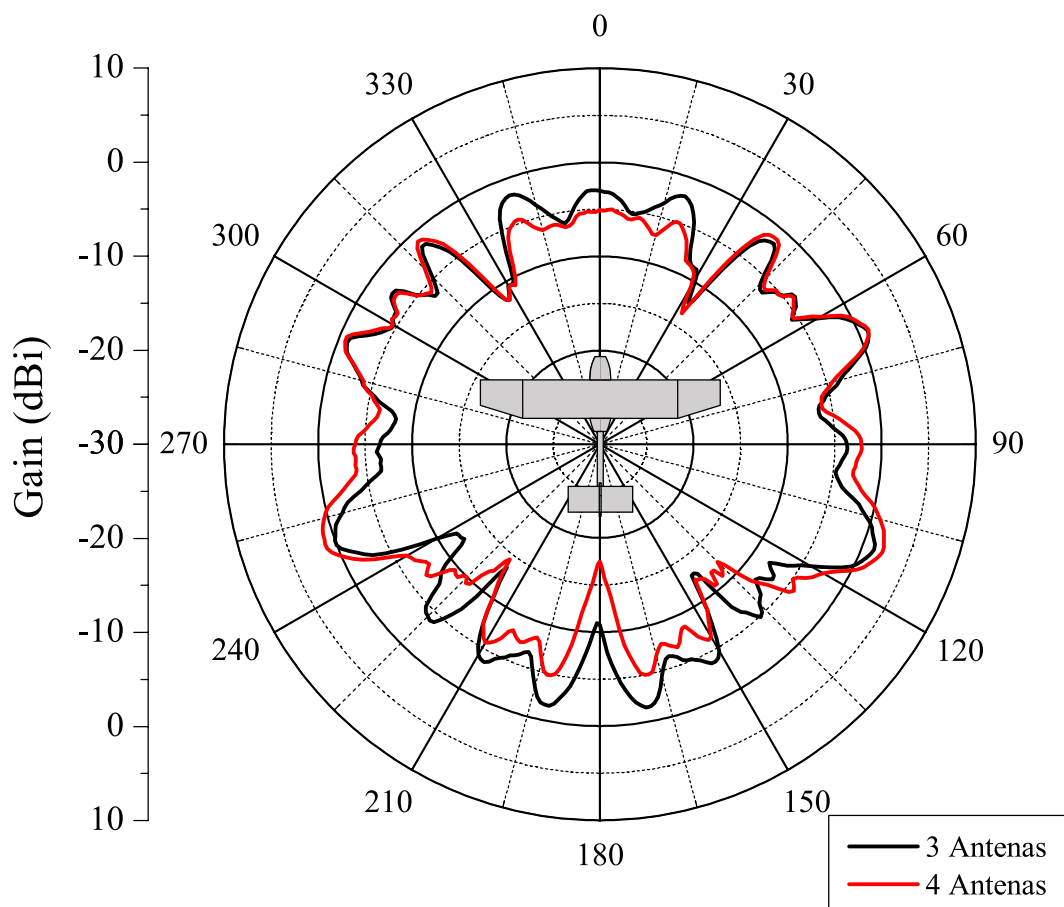


Fig. 28 – Diagrama de Irradiação da rede na posição 3

colocar a rede na posição 5 pois o boom é um tubo oco com 4 cm de diâmetro o que

forçaria o cabo coaxial de alimentação a realizar uma curva de raio bem pequeno para alimentar a antena. Essa configuração pode ser vista na Fig. 29.

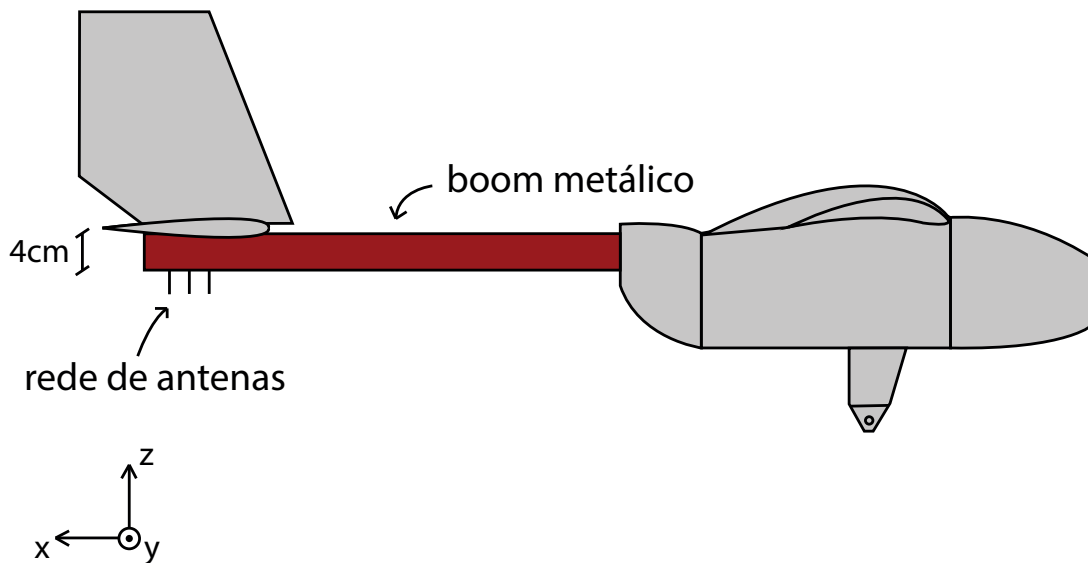


Fig. 29 – Vista lateral do VANT com a rede instalada na posição 5.

Em um primeiro momento, a melhor escolha parecia ser na posição 2. No entanto, devido à presença do trem de pouso, existe um nulo indesejável no diagrama (ver Fig. 23) que impede que o mesmo seja apontado para $\phi = 135^\circ$ e $\phi = 225^\circ$ e, por consequência, a cobertura de todo o espaço ficaria comprometida. Esse efeito é demonstrado na Fig. 30. O diagrama de uma rede é a multiplicação do diagrama do elemento por um fator denominado fator de rede. Por isso, independentemente da quantidade de elementos e do espaçamento entre eles, caso haja um nulo no diagrama do elemento, esse nulo será carregado para rede.

Optou-se, então, pela instalação da rede na posição 5 para contornar os inconvenientes antes mencionados. Sabe-se, da teoria, que quanto maior a quantidade de elementos, maior será a diretividade da rede, pois, aumentando-se o comprimento elétrico efetivo, aumenta-se a potência recebida da onda eletromagnética. Para a escolha da quantidade de elementos, simulou-se uma rede com 3 e 4 elementos para analisar o ganho e, depois de gerar os apontamentos, a área de cobertura da rede. É possível notar o efeito do aumento da diretividade na Fig. 31, onde os diagramas das duas redes, estão sobrepostos. Esse efeito é tido como benéfico na maioria das vezes, porém, nesse trabalho, como uma das diretrizes é gerar a maior cobertura com menor complexidade, quanto mais diretiva for a rede, maior deverá ser o número de apontamentos que deverão ser gerados, o que implicaria em uma complexidade muito alta no projeto do divisor.

Ao se analisar as Figs. 32 e 33, chega-se a conclusão de que com 3 antenas já é possível gerar a cobertura desejada com um menor número de apontamentos. É notório na Fig. 32 que, ao apontar o diagrama para 45° , esse se sobrepõe ao end-fire, inviabilizando a

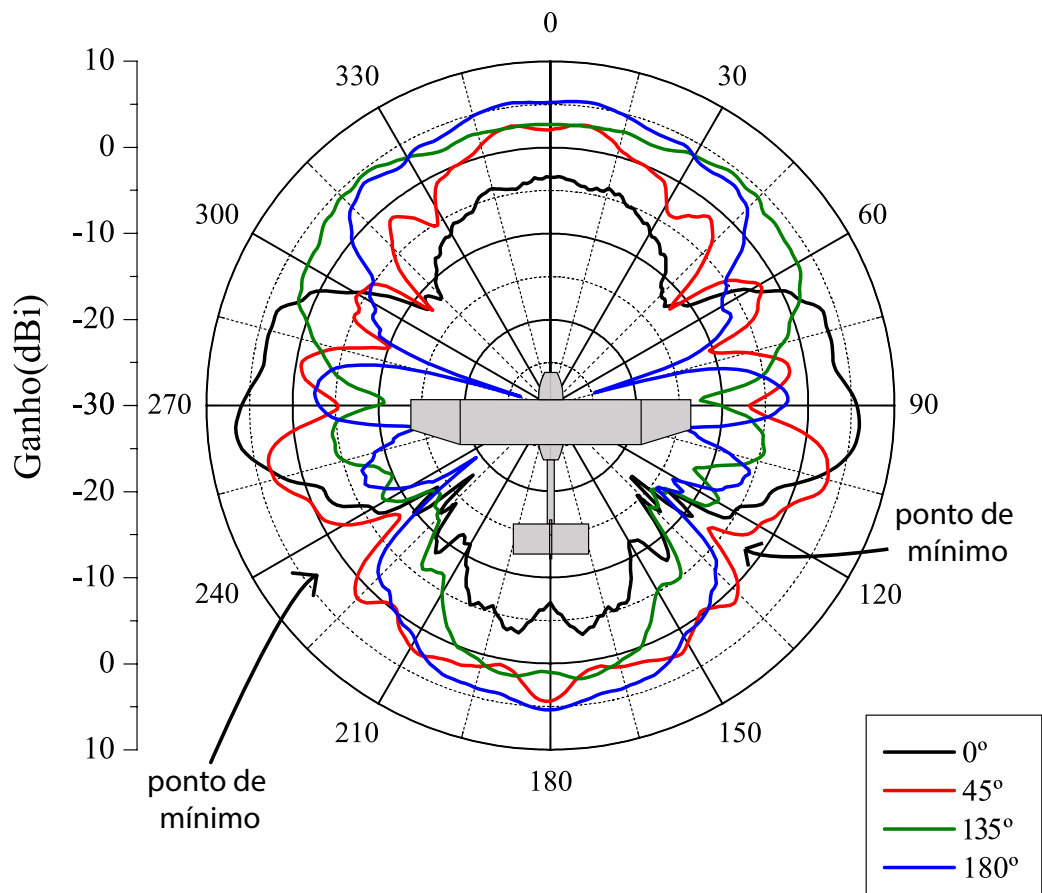


Fig. 30 – Diagramas de Irradiação da rede de 3 monopolos com diferentes apontamentos instalada na posição 2.

utilização do último apontamento citado. Essa escolha tem duas facetas: a primeira delas é a menor variação na impedância de entrada das antenas devido ao menor número de apontamentos. Por outro lado, um número ímpar de antenas torna o divisor de potência um pouco mais complexo.

3.2 Projeto do Alimentador

Como a melhor configuração encontrada para atender as especificações foi uma rede de antenas, uma parte vital do projeto é a alimentação de cada elemento. Todo o sistema alimentador pode ser dividido em duas partes, são elas: divisor de potência e casador de impedâncias.

A variação na amplitude e na fase da corrente que alimentará cada antena é responsável por controlar os lóbulos secundários e conformar o lóbulo principal do diagrama de irradiação da rede. Devido à complexidade de projeto e do tempo disponível para o desenvolvimento, esse tipo de controle foge do escopo desse trabalho. Por isso, fixou-se as amplitudes das correntes de excitação como sendo iguais.

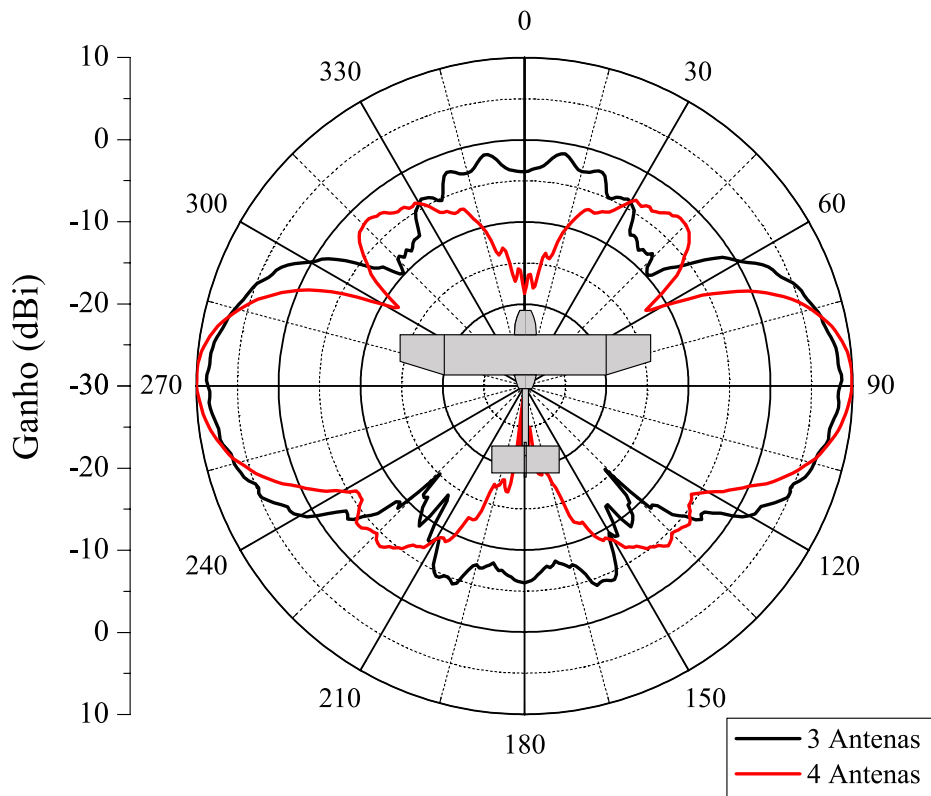


Fig. 31 – Comparação das redes com três e quatro elementos na posição 5 com apontamentos para $\phi = 90^\circ$ e $\phi = 270^\circ$.

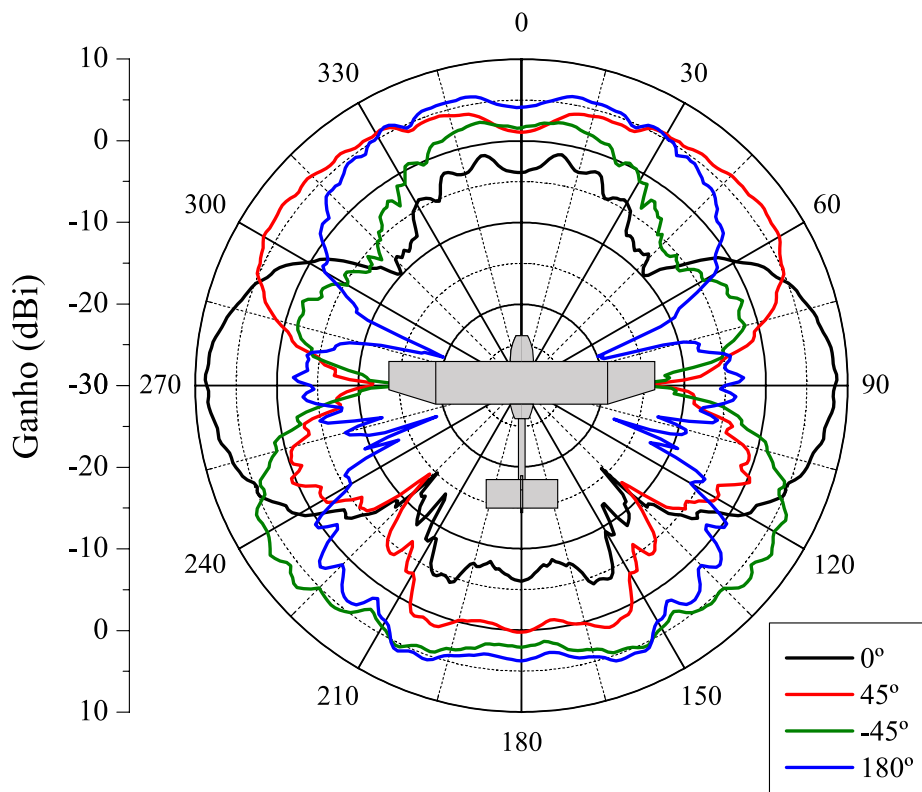


Fig. 32 – Apontamentos da rede com 3 antenas instalada na posição 5.

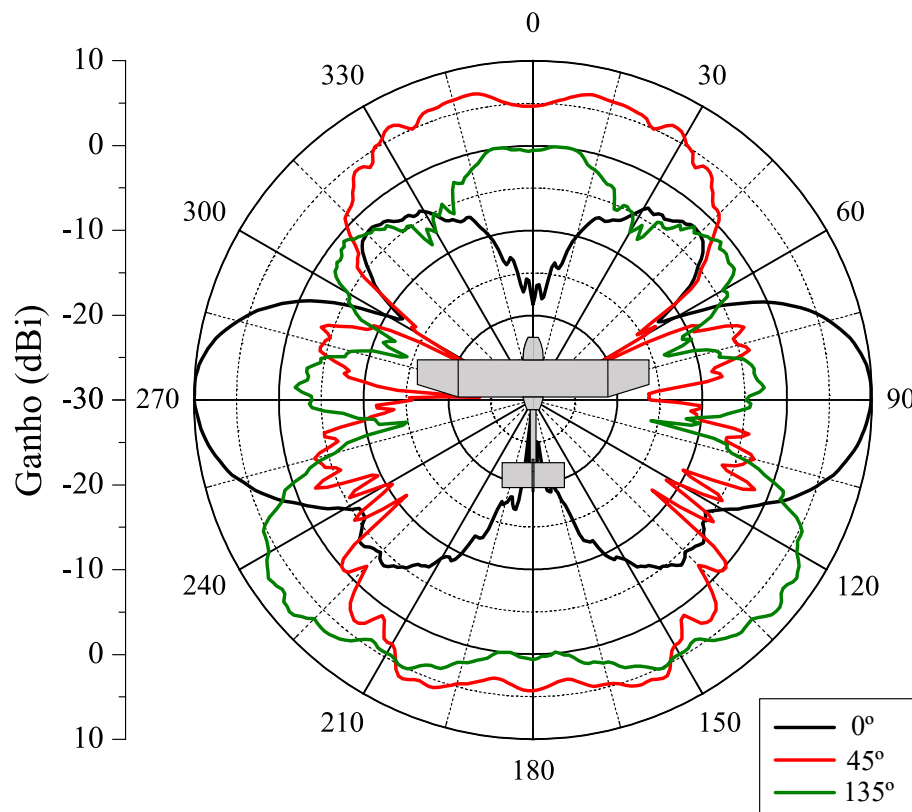


Fig. 33 – Apontamentos da rede com 4 antenas instalada na posição 5.

Para que não hajam grandes perdas por reflexão entre o cabo coaxial e as antenas, existe a necessidade de uni-los por um casador de impedância. Esse dispositivo tem o papel de minimizar as perdas de potência na linha de alimentação e garantir a entrega de máxima potência do gerador para a carga, melhorar a relação sinal ruído e reduzir os erros de fase e amplitude.

Além disso, para gerar os apontamentos anteriormente discutidos, foi necessário variar-se a fase das correntes. Essa variação afeta a impedância de entrada dos elementos. Por isso, faz-se necessária a utilização de um casador de impedâncias de banda larga, ou seja, um casador capaz de minimizar as perdas por reflexão para todos os apontamentos. Existem inúmeras técnicas de casamento de impedância; dentre elas se destacam: seção L, transformador $\lambda_g/4$, transformador multi-seção binomial e o transformador de Chebyshev. O maior problema no projeto do casador é o espaço disponível no *boom* para sua alocação. Foram estudadas três topologias que contornam esse problema.

A primeira delas seria adicionar um comprimento de linha de modo a percorrer todo o *boom* e fazer o casamento dentro da fuselagem do avião. Desconsiderando-se o estado transitório, essa topologia geraria uma onda estacionária em toda a linha de transmissão que não interferiria na reflexão. Porém, a razão sinal-ruído pioraria e qualquer variação na frequência de operação giraria a impedância de entrada na Carta de Smith, causando assim uma grande reflexão. Pois, o comprimento de linha a ser adicionado é proporcional ao

Apontamento	Antenas	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
Broadside	Antena 1	44,21	22,13
Broadside	Antena 2	38,39	51,14
Broadside	Antena 3	44,63	23,49
+45°	Antena 1	27,61	12,72
+45°	Antena 2	36,44	-1,98
+45°	Antena 3	63,86	-11,73
-45°	Antena 1	64,50	-11,82
-45°	Antena 2	36,56	-3,24
-45°	Antena 3	26,84	13,51

Tabela 2 – Impedância de entrada das antenas para cada apontamento

comprimento de onda guiado; assim, a banda de casamento diminuiria substancialmente. Esse método contornaria brilhantemente o problema de espaço mas acrescentaria problemas ainda maiores e, por isso, foi descartado.

Uma outra topologia é a utilização do transformador multi-seção binomial, pois, além de ser um casador de faixa larga, tem a área reduzida e permite a máxima transferência de potência na banda de passagem; com essa técnica, casar-se-iam todas as impedâncias de entrada, geradas pelos apontamentos. As defasagens das correntes poderiam ser geradas eletronicamente. Essa técnica consiste em unir segmentos de linha com diferentes impedâncias cujo comprimento de cada seção é $\lambda_g/4$. A quantidade de segmentos é função da largura de banda necessária. No entanto, esse transformador leva em consideração somente a parte real da impedância (resistência) e, ao observar a Tabela 2, verifica-se uma grande variação na reatância de entrada. Para se realizar o completo casamento, nessa técnica, utiliza-se um comprimento de linha para compensar a parte imaginária e como existe uma grande variação, esse comprimento também varia muito. Uma das saídas é a escolha de um comprimento médio entre os apontamentos e realizar a otimização do casador apenas para essa impedância.

A última topologia estudada consiste no desenvolvimento de um divisor para cada apontamento e chavear entre os diferentes caminhos utilizando um microcontrolador e um diodo PIN. Nessa solução, diminui-se consideravelmente a reflexão mas aumenta-se o tamanho de toda a estrutura, visto que serão necessários 3 circuitos divisores. Assim, utiliza-se um comprimento para compensar a parte imaginária da impedância, um toco ou transformador $\lambda_g/4$ para casar a parte real e mais um comprimento de linha para defasar as fases. Optou-se pelo transformador pois como é colocado em série, diminui o tamanho do circuito. A impedância do transformador é calculada pela equação (3.2).

Começa-se a numeração das antenas pela parte de trás da aeronave.

$$Z_T = \sqrt{Z_0 Z_l} \quad (3.2)$$

Onde: Z_T é a Impedância característica do transformador, Z_0 a Impedância característica da linha de transmissão e Z_l a Impedância da antena.

Todos esses cálculos são feitos utilizando o λ_g , que é função dos parâmetros do substrato utilizado, como mostra a equação (3.3).

$$\lambda_{guiado} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (3.3)$$

Onde λ_g é lambda na linha de transmissão, c a velocidade da luz e ϵ_{ef} é a Permissividade efetiva da estrutura.

Além do projeto do casador, faz-se necessário projetar um divisor de potência que entregue na saída potências com amplitudes iguais. Para atingir esse objetivo, utiliza-se um divisor de junção T e, através do princípio de conservação de energia, encontram-se as equações que o regem, dado por:

$$P_{entrada} = P_1 + P_2 \quad (3.4)$$

Onde $P_{entrada}$ é Potência de entrada no divisor, P_1 a Potência na saída 1 e P_2 a Potência na saída 2.

Fazendo $P_1 = \alpha P_2$ e substituindo na equação (3.4) encontra-se que $P_{ent} = (1+\alpha)P_2$. Utilizando a equação (3.5) tem-se:

$$P_1 = \frac{V_0^2}{2Z_1} \quad (3.5)$$

Onde P_1 é a Potência na saída 1, V_0 a Tensão na saída 1 e Z_1 a Impedância na saída 1.

Por fim substituindo na equação (3.5) a expressão encontrada anteriormente obtém-se:

$$Z_l = (1 + \alpha)Z_{ent} \quad (3.6)$$

Onde Z_l é a Impedância na saída 1 e Z_{ent} a Impedância na entrada.

Como se deseja obter a mesma potência em três saídas, utilizou-se dois divisores de junção T. Para o primeiro divisor, $\alpha = 2$; para o segundo, $\alpha = 1$, a potência é dividida em $\frac{1}{3}$ para primeira saída. Assim, como Z_0 é igual a 50Ω então, com o auxílio da equação (3.6) tem-se:

Divisor 1:

$$Z_1 = 75 \Omega;$$

$$Z_2 = 150 \Omega;$$

Divisor 2:

$$Z_1 = 150 \Omega;$$

$$Z_2 = 150 \Omega;$$

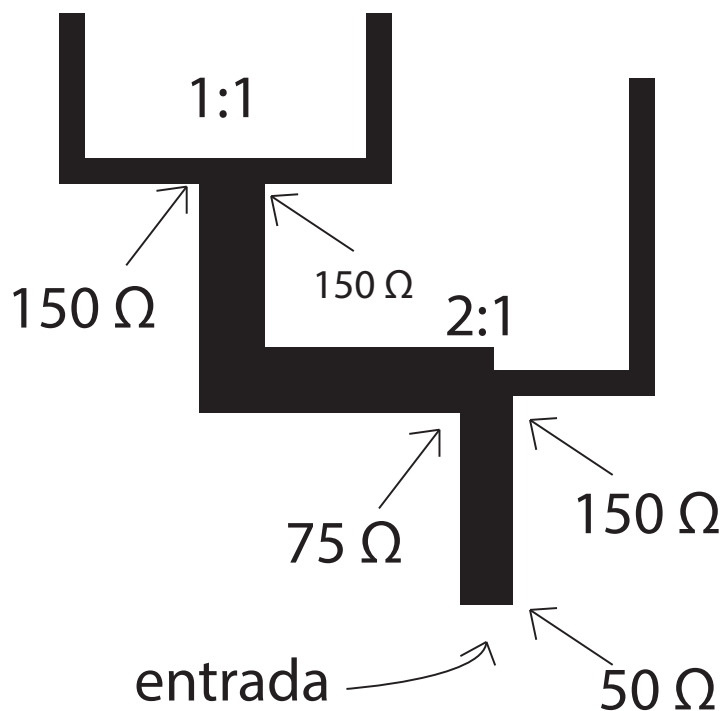


Fig. 34 – Esboço do divisor de potência.

A Fig. 34 ilustra, de forma esquemática, o divisor de potência obtido com os valores apresentados de resistência.

É visível que até agora só casou-se a parte real da impedância de entrada, restando assim a parte imaginária. Como dito anteriormente, um comprimento de linha é adicionado para compensar a parte reativa. O tamanho dessa linha é determinado utilizando-se a Carta de Smith, onde, depois de normalizada, a impedância de entrada é plotada na carta e uma linha passando pelo centro da carta e pelo ponto é traçada e a diferença de valores entre o ponto externo e a linha horizontal da carta é o comprimento da linha (em função de λ_g) a ser adicionado. A Fig. 35 ilustra esse processo.

A tabela 3 expõe os valores encontrados para cada apontamento.

Na tecnologia de microfita, esses valores de impedância modificam a largura da linha. Essa largura é estimada pelo software (TX-LINE: TRANSMISSION LINE CALCULATOR,

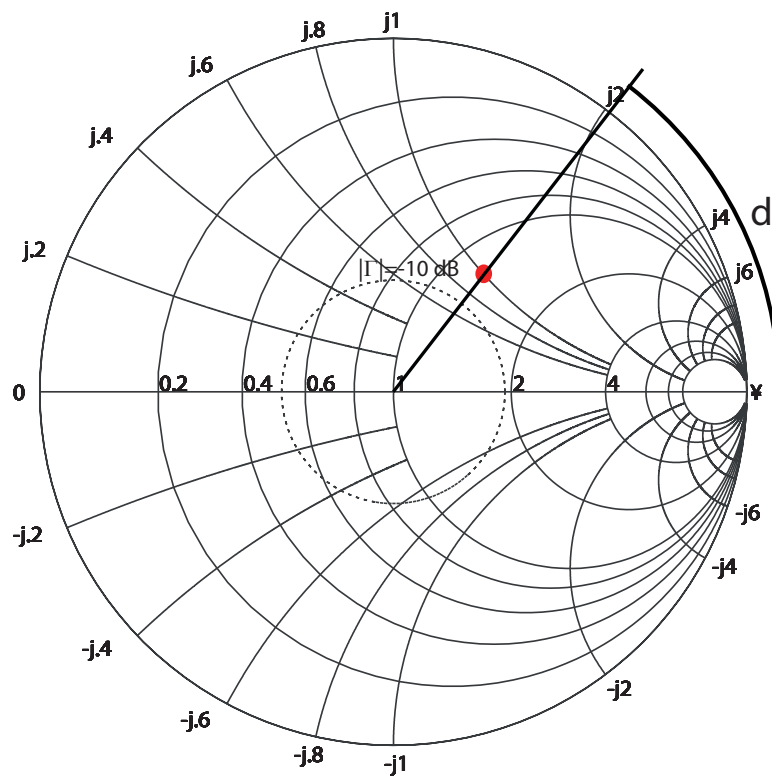


Fig. 35 – Comprimento da linha mostrado na Carta de Smith.

Apontamento	Antena	Z_{transf} (Ω)	Comprimento LT (λ_g)
Broadside	Antena 1	47,01	0,134 λ
Broadside	Antena 2	43,81	0,103 λ
Broadside	Antena 3	47,23	0,135 λ
+45°	Antena 1	37,15	0,194 λ
+45°	Antena 2	42,68	0,325 λ
+45°	Antena 3	56,50	0,453 λ
-45°	Antena 1	56,78	0,457 λ
-45°	Antena 2	42,75	0,257 λ
-45°	Antena 3	36,63	0,192 λ

Tabela 3 – Transformador de $\lambda_g/4$ e comprimento da Linha de Transmissão

) e depois deve ser simulada para realizar as otimizações. Um bom programa para tais simulações é o (DESIGNER, 2015).

Conclusão

Esse trabalho apresentou uma análise dos métodos de simulação disponíveis no software HFSS (ANSYS HFSS USERS' GUIDE VERSION 15.0, 2015), uma metodologia para escolha de uma posição otimizada de um monopolo instalado sobre a aeronave e, também, o desenvolvimento de uma rede de monopolos.

A introdução apresentou uma revisão bibliográfica para descrever o estado-da-arte no tema abordado. Com isso, foi possível definir as principais diretrizes do trabalho. Ao apresentar a geometria da aeronave, constatou-se que, devido à sua complexidade, as simulações se tornariam muito demoradas. Assim, para otimizá-las, discorreu-se a respeito de cada uma das técnicas disponíveis no software HFSS, concluindo-se que a melhor delas, para esse caso, é a condição de contorno híbrida FE-BI.

Escolhida a técnica de simulação, passou-se para a escolha da melhor posição para instalação de antenas sobre a aeronave. Para isso, simulou-se um monopolo instalado sobre a aeronave em cinco posições. Cada posição apresentou características positivas e negativas, porém, na posição 5 os diagramas de irradiação se mostraram mais próximos do que se esperava, ou seja, não apresentaram uma grande quantidade de nulos e tampouco pontos de mínimo. Observou-se a presença de irregularidades nos diagramas devido ao efeito de difração de borda.

A fim de alcançar uma cobertura total e com alto ganho, optou-se pelo desenvolvimento de uma rede de antenas. Uma análise da quantidade de elementos necessários para gerar quatro apontamentos foi realizada. Optou-se por três elementos, pois, além de possibilitar a cobertura total, facilita, também, no casamento de impedâncias, uma vez que acoplamento mútuo mais baixo foi verificado.

Ao observar os apontamentos gerados pela rede com três elementos, constatou-se que, ao contrário do que se esperava, três apontamentos eram suficientes para uma cobertura total. Foram encontradas, então, as impedâncias de entrada de cada elemento, em cada apontamento, e passou-se à discussão da melhor topologia para o alimentador.

Para realização prática do alimentador, foram consideradas três topologias: divisor em T com casador $\frac{\lambda}{4}$, um comprimento de linha e o divisor em T, e, por último, um transformador multi-seção binomial. Suas principais características foram apresentadas, porém, devido ao tempo, foi impossível desenvolvê-los. No entanto, uma figura esquemática do divisor em T foi apresentada.

O segmento de VANTs está em crescimento acelerado em todo o mundo e, por isso, ressalta-se a importância desse trabalho. Seguindo os passos descritos nos capítulos

anteriores, é possível desenvolver de modo otimizado uma rede de monopolos para diversas aeronaves, cumprindo-se com o objetivo inicial. Atrelado a isso, existe o fato de todas as conclusões tecidas, no decorrer do trabalho, serem pautadas em argumentos técnicos aplicáveis a outras aeronaves.

Como o tempo de desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso é limitado, foi impossível ampliar a discussão e abranger outras partes do projeto. Assim, existem inúmeros trabalhos que podem ser desenvolvidos dando continuidade a esse; dentre eles, destacam-se: o desenvolvimento de um sistema microcontrolado para chavear os diferentes apontamentos, inclusão de dados de *GPS* para escolher o apontamento, inclusão de *beamforming* mais complexo, prototipagem e realização de testes em campo de todas as partes que compõe o sistema de telemetria.

Referências

- ANSYS. *Manual HFSS: Hybrid FE-BI for Efficient Simulation of radiation and Scattering*. 2014. Citado na página 27.
- ANSYS HFSS USERS' GUIDE VERSION 15.0. *ANSYS corporation*. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 51.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory - Analysis and Design*. 3ª edição. ed. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 39.
- CHEN, J.; WANG, J. A gps/wi-fi dual-band arc-shaped slot patch antenna for uav application. *Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 2013. Citado na página 19.
- DESIGNER. *Ansoft Corporation*. 2015. Citado na página 49.
- HECKLER, M. V. *Notas de aula*. 2015. Citado na página 17.
- HECKLER, M. V.; DREHER, A. Comparison of asymptotic and full-wave predictions of installed antenna performance on airframes. 2006. Citado na página 19.
- HECKLER, M. V.; DREHER, A. Performance of microstrip antenna arrays installed on aircraft. 2012. Citado na página 18.
- HUANG, X. L. X.; GENG, Q. The optimization of uav airborne antennae's position based on genetic algorithm. *International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization*, 2011. Citado na página 19.
- IEEE. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1969. AP-22. Citado na página 17.
- KOUYOUMIAN, R. G.; PATHAK, P. H. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface. *Proceedings of the IEEE*, 1974. Citado na página 35.
- LEE, H.-C.; KIM, I.-K. Antenna design of collision avoidance radar system for the smart uav. 2004. Citado na página 19.
- NGAI, A. J. F. E. C.; EAPEN, A. K.; NEWMAN, E. H. Radiation characteristics of small antennas on small uav platforms. 2004. Citado na página 18.
- RAHARDJO FITRI YULI ZULKIFLI, B. D. Y. H. E. T.; SUMANTYO, J. T. S. Circularly polarized microstrip antenna array for uav application. 2013. Citado na página 18.
- SOLID WORKS. *Dassault Systemes SolidWorks Corp*. Citado na página 22.
- TX-LINE: TRANSMISSION LINE CALCULATOR. *National Instruments*. Citado na página 49.