

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**ÁBDA MORIÁ SOARES CUNHA  
ANA CLARA FELIZARDO DE PAULA**

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE GEOMETRIAS DE  
UM VANT PARA APLICAÇÃO STEALTH NAS BANDAS S,  
C E X COM SIMULAÇÕES DE RCS NO FEKO**

São José dos Campos

2024

**ÁBDA MORIÁ SOARES CUNHA  
ANA CLARA FELIZARDO DE PAULA**

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE GEOMETRIAS DE  
UM VANT PARA APLICAÇÃO STEALTH NAS BANDAS S,  
C E X COM SIMULAÇÕES DE RCS NO FEKO**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.

**Orientador Interno: Dr. Jorge Tadao Matsushima  
Orientador Externo: Me. Bráulio Haruo Kondo Lopes**

São José dos Campos

2024

**FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal**  
**Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação**

CUNHA, Ábda Moriá Soares  
DE PAULA, Ana Clara Felizardo

Desenvolvimento e Estudo de Geometrias de um VANT para Aplicação Stealth nas Bandas S, C e X com Simulações de RCS no FEKO. /Ábda Moriá Soares Cunha, Ana Clara Felizardo de Paula. – São José dos Campos, 2024.

69f.

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2024.

Orientador: Dr. Jorge Tadao Matsushima.  
Orientador Externo: Me. Bráulio Haruo Kondo Lopes

1. stealth. 2. RCS. 3. VANT. I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título.

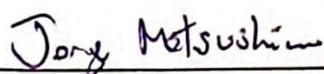
**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CUNHA, Ábda Moriá Soares; DE PAULA, Ana Clara Felizardo; **Desenvolvimento e Estudo de Geometrias de um VANT para Aplicação Stealth nas Bandas S, C, e X com Simulações de RCS no FEKO**. 2024. 69f. Trabalho de Graduação - FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal.

**ÁBDA MORIÁ SOARES CUNHA  
ANA CLARA FELIZARDO DE PAULA**

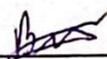
**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE GEOMETRIAS DE  
UM VANT PARA APLICAÇÃO STEALTH NAS BANDAS S,  
C E X COM SIMULAÇÕES DE RCS NO FEKO**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Tecnólogo em Projetos de Estruturas Aeronáuticas.



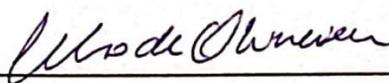
---

**Dr. Jorge Tadao Matsushima – FATEC SJC**



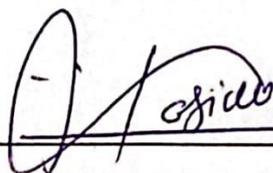
---

**Me. Bráulio Haruo Kondo Lopes – INPE**



---

**Me. Celso de Oliveira – FATEC SJC**



---

**Me. Fabiana Eloisa Passador – FATEC SJC**

**05/12/2024**

**DATA DA APROVAÇÃO**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de expressar nossa gratidão a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Agradecemos aos nossos orientadores, Dr. Jorge Tadao Matsushima e Me. Bráulio Haruo Kondo Lopes, pela paciência, apoio e orientações, que foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto. Suas contribuições técnicas e incentivos nos ajudaram a superar desafios e alcançar nossos objetivos.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), somos profundamente gratas pela parceria e pelo suporte na realização das análises, que enriqueceram imensamente este trabalho.

Aos professores da FATEC São José dos Campos, que, ao longo do curso, compartilharam conhecimento e nos prepararam para encarar desafios acadêmicos e profissionais, deixamos nosso mais sincero agradecimento.

Agradecemos também às nossas famílias, pelo apoio e compreensão, especialmente nos momentos mais desafiadores. Sem vocês, este trabalho não seria possível.

Por fim, agradecemos aos nossos colegas e amigos, pela troca de experiências e encorajamento durante toda a faculdade.

A todos, nosso muito obrigada.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a análise de geometrias para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) com foco na redução da assinatura radar (furtividade) em frequências das bandas S, C e X, características críticas para operações em ambientes hostis, especialmente no contexto militar. A metodologia utilizou o *software* FEKO para simulações de Seção Reta Radar (RCS) avaliando diferentes configurações geométricas e materiais. Foram projetadas inicialmente, três geometrias principais baseadas em aeronaves reais: *Shadowhawk*, inspirada no *MQ-9A Reaper*; *Thor*, baseada no *F-117 Nighthawk*; e *Hidden Viper*, inspirada no *Sukhoi Su-57*. Cada modelo foi analisado quanto à dispersão de ondas eletromagnéticas, destacando como geometrias com superfícies facetadas, ângulos agudos e suaves impactam a furtividade. A análise incorporou a caracterização de compósitos de fibra de carbono com resina epóxi, realizada em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para avaliar a eficácia na reflexão de ondas eletromagnéticas. Esses materiais foram incorporados às simulações para que seja avaliado precisamente os efeitos de reflexão das geometrias complexas no RCS das aeronaves, para isso é importante utilizar no modelo CAD um material que consiga refletir a maior quantidade de sinal, neste caso um PEC (*perfect electric conductor*), o compósito fibra-carbono obteve excelentes resultados, refletindo aproximadamente 90% do sinal na simulação. Com base nos resultados obtidos, foi desenvolvida uma quarta geometria, chamada *Nautilus*, que combinou as melhores características das anteriores, demonstrando um desempenho superior, seu bordo de fuga, por exemplo, atinge -20 dB nas frequências analisadas, destacando sua adequação para missões estratégicas de alta complexidade, como vigilância estratégica e ataques de precisão. Em relação a análise de materiais absorvedores, considerou-se o compósito feito à base de uma matriz de silicone dielétrica e ferrocarbonila com aditivo a melhor opção para o projeto, já que ele apresentou um pico de absorção de 99,6% em uma frequência de 9,6 GHz para uma amostra de 2mm de espessura. Os resultados do estudo confirmam que a combinação de *design* geométrico otimizado e materiais avançados é fundamental para maximizar a furtividade de VANTs, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de aeronaves mais eficazes em missões militares e civis. Este trabalho reforça a relevância de integrar tecnologias modernas no campo da furtividade aeroespacial, promovendo avanços na segurança e eficiência operacional e na segurança em operações militares e civis.

**Palavras-Chave:** furtividade; RCS; VANT; FEKO®; materiais absorvedores de radiação eletromagnética.

## ABSTRACT

This study presents the development and analysis of geometries for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with a focus on reducing radar signature (stealth) in S, C, and X-band frequencies, which are critical for operations in hostile environments, particularly in military contexts. The methodology employed the FEKO software for Radar Cross Section (RCS) simulations, evaluating different geometric configurations and materials. Initially, three main geometries inspired by real aircraft were designed: Shadowhawk, inspired by the MQ-9A Reaper; Thor, based on the F-117 Nighthawk; and Hidden Viper, inspired by the Sukhoi Su-57. Each model was analyzed for electromagnetic wave scattering, emphasizing how geometries with faceted surfaces, sharp angles, and smooth transitions impact stealth. The analysis included the characterization of carbon-fiber composites with epoxy resin, conducted in partnership with the National Institute for Space Research (INPE), to evaluate their effectiveness in reflecting electromagnetic waves. These materials were incorporated into the simulations to accurately assess the effects of complex geometries on the RCS of the aircraft. For the CAD model, a material capable of reflecting the maximum signal, such as a PEC (Perfect Electric Conductor), was used. The carbon-fiber composite demonstrated excellent results, reflecting approximately 90% of the signal in the simulation. Based on the results, a fourth geometry, named Nautilus, was developed by combining the best features of the previous designs, demonstrating superior performance. For instance, its trailing edge achieved -20 dB at the analyzed frequencies, highlighting its suitability for high-complexity strategic missions such as strategic surveillance and precision strikes. Regarding the analysis of absorbing materials, a composite based on a dielectric silicone matrix with carbonyl iron additive was considered the best option for the project. It exhibited an absorption peak of 99.6% at a frequency of 9.6 GHz for a 2 mm-thick sample. The study's findings confirm that combining optimized geometric design with advanced materials is critical to maximizing UAV stealth, significantly contributing to the development of more effective aircraft for military and civilian missions. This work reinforces the importance of integrating modern technologies in the field of aerospace stealth, promoting advancements in operational safety and efficiency for military and civilian operations.

**Keywords:** stealth; RCS; UAV; FEKO®; radar-absorbing materials.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1. Objetivo Geral .....	11
1.2. Objetivos Específicos .....	12
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
2.1. Conceitos Gerais.....	13
2.2. Contexto Histórico Militar .....	14
2.3. Conceito de Tecnologia Stealth.....	15
2.4. Concepção e Desenvolvimento do VANT Stealth .....	15
<b>3. DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>17</b>
3.1. Benchmark.....	17
3.2. Asa .....	22
3.2.1. Perfil da Asa .....	22
3.2.2. Aerodinâmica Básica do VANT .....	24
3.3. Dimensionamento Estrutural .....	26
3.4. Missões Definidas .....	30
3.5. Comportamento Eletromagnético.....	31
3.6. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética.....	34
3.7. Materiais e Métodos .....	36
3.8. Simulação no Software FEKO® e Caracterização do Compósito Fibra-carbono.....	40
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
4.1. Análise das Geometrias Projetadas .....	43
4.1.1. Geometria Inicial .....	43
4.1.2. Shadowhawk.....	46
4.1.3. Thor.....	49
4.1.4. Hidden Viper .....	53
4.2. Geometria Final Nautilus .....	57
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>62</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, ondas eletromagnéticas desempenham um papel essencial em aplicações como transmissão de dados, detecção de objetos, mapeamento, controle de espaço e, entre outras aplicações, graças à sua grande capacidade de transmitir grandes volumes de informações a diferentes distâncias (LOPES et al., 2022). Em especial, sistemas de radar têm sido de enorme interesse para diversos setores da indústria automotiva, aeronáutica, naval, aeroespacial, e sobretudo no meio militar, para proteção, controle e detecção no espaço aéreo, operando frequentemente nas bandas de frequência S (2-4 GHz), C (4-8 GHz) e X (8-12 GHz) (NOGUEIRA, 2022).

Sob essa perspectiva, no cenário de proteção nacional, a obtenção de recursos tecnológicos de é crucial. Nesse contexto, a questão da não detecção tem ganhado cada vez mais relevância em diversas partes do espectro eletromagnético (MELO, BARBOSA, LIMA, 2022). Esta questão pode ser analisada de forma mais aprofundada ao se considerar a evolução militar relacionada aos conflitos armados e as Revoluções nos Assuntos Militares (RAM) que marcaram avanços significativos nas tecnologias de guerra. Esses avanços incluem por exemplo, a mecanização de aeronaves e o uso de armas químicas durante a Primeira Guerra Mundial, assim como o desenvolvimento de munições de precisão e sensores de grandes áreas em tempos mais recentes (LUNA, DIAS, ALMEIDA, 2016).

Com o crescimento exponencial da transformação tecnológica promovida pela Indústria 4.0, especialmente no que se refere aos drones militares, o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), tem se destacado em operações de combate e apoio ao solo, como observado em conflitos recentes, a exemplo do Afeganistão e da guerra na Ucrânia (GOMES et al., 2023).

Baseado nas considerações feitas, este trabalho tem como objetivo o estudo e o desenvolvimento de uma estrutura de VANT com geometria voltada para o aumento da capacidade *stealth*. É importante destacar que, com exceção da última geometria, denominada *Nautilus*, o trabalho não visa criar novas geometrias, mas sim adaptar e analisar modelos existentes. As geometrias desenvolvidas têm como objetivo reduzir a reflexão de ondas eletromagnéticas, utilizando parâmetros e padrões que influenciam diretamente na detecção da aeronave, considerando as ondas eletromagnéticas incidentes sobre a superfície e emitidas por radares. Essa análise será fundamentada em referências bibliográficas e na comparação com aeronaves já existentes no mercado. Para facilitar a abordagem e a identificação das geometrias, serão utilizados nomes específicos: *Shadowhawk* para a

primeira, *Thor* para a segunda, *Hidden Viper* para a terceira. Além disso, o trabalho incluirá a análise de tipos, aspectos e propriedades de materiais aplicáveis às estruturas de VANTs com o objetivo de maximizar a furtividade e minimizar a detecção ao radar.

O estudo será realizado em duas etapas. A primeira etapa consiste na caracterização eletromagnética de um compósito estrutural de fibra de carbono com resina epóxi utilizado em fuselagem de VANTs para determinar o índice de reflexão. Esta caracterização será realizada em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com suporte técnico especializado do grupo de Materiais Avançados e Pesquisas Espaciais - MAPA. Na segunda etapa, serão projetadas quatro geometrias em CAD 3D para possíveis modelos VANTs seguidas de simulações de RCS utilizando o *software* FEKO® da empresa ALTAIR®. As simulações serão realizadas nas Bandas S (2-4 GHz), C (4-8 GHz), e X (8-12 GHz), utilizando as frequências centrais de cada banda, 3 GHz, 6 GHz e 10 GHz respectivamente. Os testes realizados ao longo do eixo horizontal, cobrindo um ângulo de azimute de 360° e com uma elevação fixa de 0°. O projeto e análise das quatro geometrias será feito por meio de um estudo comparativo entre produtos que já estão no mercado, avaliando os principais parâmetros geométricos e buscando os melhores pontos das aeronaves para aplicar no atual estudo.

Vale destacar que o presente estudo é focado no projeto de aeronaves para estudo de sua detecção em diferentes faixas de frequências. Desta forma, os conceitos aprofundados de cálculos de RCS e todo princípio de equacionamento para tal não será discutida a fim de priorizar apenas as influências relacionadas ao ramo de projetos de estruturas aeronáuticas sem correlacionar diretamente às percepções de operação de radares propriamente dito.

### 1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é projetar e analisar como diferentes geometrias de aeronaves podem influenciar na furtividade de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) a radares. Isso será alcançado variando os requisitos de missão e a geometria de diferentes aeronaves analisadas, para que no final seja projetada uma geometria de um VANT. Também serão avaliados os parâmetros que são importantes para maximizar sua invisibilidade a radares que operam nas Bandas S, C e X. A furtividade a radares é uma característica crucial em muitas aplicações militares e civis de VANTs, pois permite que a aeronave evite a detecção por sistemas de radares hostis.

## 1.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização eletromagnética de compósitos a base de fibra de carbono e resina epóxi em parceria com o INPE;
- Projetar quatro modelos de VANTs em CAD, utilizando o *software* CATIA V5 com base em aeronaves existentes e pesquisa de mercado, variando parâmetros que influenciam diretamente a furtividade do objeto;
- Executar simulação utilizando o *software* FEKO® para avaliar o comportamento das geometrias de VANT nas frequências centrais das bandas S (3 GHz), C (6 GHz) e X (10 GHz) analisando o desempenho das configurações em um cenário modelado;
- Examinar como diferentes formas e configurações geométricas afetam a visibilidade dos VANTs pelos radares;
- Investigar materiais que minimizem a reflexão das ondas eletromagnéticas combinado aos resultados da melhor geometria identificada, priorizando o uso de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) para otimizar a furtividade.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Conceitos Gerais

Inicialmente, é importante compreender o significado do termo VANT, acrônimo para Veículo Aéreo Não Tripulado que se originou da tradução de *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). No entanto, o termo VANT não é mais reconhecido pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), sendo considerado obsoleto. Atualmente a nomenclatura técnica internacionalmente aceita é *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS) (FIORIO, 2024). Todavia, o termo VANT ainda é amplamente utilizado em documentos científicos e para fins acadêmicos.

O termo RPAS refere-se aos sistemas de aeronaves remotamente pilotados que são utilizados para fins não recreativos, como missões militares e aplicações comerciais (FIORIO, 2024). Além disso, o RPAS não se refere apenas à aeronave em si, mas também engloba o conjunto representado pela RPA e todos os equipamentos necessários para a sua operação (ANAC, 2015). Esses conjuntos de equipamentos e operações geralmente compreendem:

- Sistema de missão, ou então *payloads* que englobam equipamentos para lançamento, recuperação e equipamentos essenciais para o exercício e desempenho esperado da missão, como sistemas eletro-ópticos, radares, armamentos, sistemas de *input* de informações que auxiliam na tomada de decisões frente à missão orquestrada (ANAC, 2015);
- Estação de pilotagem remota, ou então estação de solo, onde ficam os operadores da aeronave e executores intermediários dos *payloads*; estes se responsabilizam pela coordenação e execução da missão de forma remota;
- Sistema de comunicação, que permite a ligação direta da estação de solo com os *payloads*, garantindo a correta operação da aeronave e a comunicação entre sistemas de satélites e tráfego aéreo (ORRA, 2020).

O termo drone é popularmente utilizado de forma coloquial para se referir aos VANTS. No entanto, há uma distinção importante entre VANTS e aeromodelos que são associados a atividades de lazer e competições (ANAC, 2015).

Os VANTS podem ser aplicados em diversas áreas da indústria aeronáutica e da engenharia, como por exemplo, são muito utilizados no mapeamento topográfico, onde desempenham a função de gerar representações precisas de espaços geográficos, incluindo

terrenos e superfícies. Há a possibilidade também de utilizar os VANTs para monitoramento ambiental, permitindo a delimitação de áreas de preservação, e facilitando o gerenciamento e controle das atividades realizadas em reservas naturais. A agricultura de precisão também é uma área que se beneficia da tecnologia avançada dos VANTs auxiliando no monitoramento, controle e otimização do cultivo de lavouras, identificando e monitorando o crescimento das plantas com base em condições ambientais e na concentração ou falta de nutrientes (AEROENGENHARIA, 2023; ITARC, 2024).

## 2.2. Contexto Histórico Militar

O conceito de VANTs remonta à década de 1840, quando o apotecário e inventor austríaco Julius Neubronner experimentou o uso de pombos-correio equipados com pequenas câmeras fotográficas. Desde então, o conceito evoluiu significativamente, impulsionado por avanços tecnológicos ao longo dos anos (AEROENGENHARIA, 2023).

Inicialmente, os VANTs encontraram seu espaço na esfera militar. Em 2000, as forças de defesa dos Estados Unidos empregaram essas aeronaves para apoiar missões militares. Devido à eficácia e à tecnologia amplamente reconhecida, em 2002, os EUA, por meio da Administração Federal de Aviação (FAA), promulgaram regulamentações que permitiram o uso comercial dos VANTS, expandindo ainda mais suas possibilidades de aplicação (ETZIONI, 2013).

Os VANTs possuem grande abrangência no que diz respeito às suas aplicações na indústria, incluindo coleta de dados de inteligência, suporte à engenharia e atividades comerciais, porém, outra aplicação que tem ganhado muita força, atualmente, é a aplicação destas aeronaves no contexto militar. Durante os conflitos armados no Afeganistão em 2007, os VANTs se consolidaram como uma das ferramentas mais versáteis das forças armadas, sendo responsáveis por 74 ataques realizados apenas naquele ano (ETZIONI, 2013). Mais recentemente, a guerra na Ucrânia exemplifica o emprego estratégico dessas aeronaves como armamento bélico. À medida que os combates se intensificam, ataques furtivos conduzido por VANTs de alta tecnologia têm se tornado cada vez mais presente, evidenciando sua importância no cenário contemporâneo de guerra (RFI, 2024).

### 2.3. Conceito de Tecnologia *Stealth*

A tecnologia *Stealth*, ou furtiva, é um conjunto de técnicas usadas para tornar aeronaves, navios e outros veículos menos detectáveis por sensores inimigos. Um radar tem como princípio básico, a emissão de radiação eletromagnética e a captação do sinal refletido por um objeto. Desta forma, a redução do sinal refletido conhecida como seção transversal do radar (seção reta radar), ou em inglês, *Radar Cross Section* (RCS), pode fazer com que uma aeronave tenha a assinatura radar equivalente à de um pequeno pássaro (SILVA et al., 2016).

Uma das principais estratégias para reduzir a detecção de um veículo é por meio do estudo de sua forma e geometria. Em aeronaves comerciais, por exemplo, o projeto inicial é concebido para refletir e direcionar as ondas eletromagnéticas de volta para a fonte emissora. Isto ocorre porque, em aplicações civis, é essencial que essas aeronaves sejam detectáveis pelas estações de comando. Contudo, para reduzir a assinatura radar, as ondas refletidas não devem voltar diretamente à fonte.

Nesse contexto, é importante que as superfícies sejam mais planas e possuam ângulos agudos. Estruturas facetadas, como as usadas no F-117, são projetadas justamente para dispersar a onda em múltiplas direções. Além disso, minimizar as áreas metálicas e usar revestimentos especiais como os MARE, também contribui para reduzir a detecção.

No entanto, é fundamental analisar os aspectos aerodinâmicos dessas mudanças geométricas, pois elas podem impactar negativamente o desempenho da aeronave. Superfícies facetadas nem sempre são ideais do ponto de vista aerodinâmico, podendo aumentar a resistência ao avanço e o arrasto. Como solução, o *design* deve ser otimizado para encontrar um equilíbrio entre a furtividade e a eficiência aerodinâmica, reduzindo o consumo excessivo de combustível e os impactos na velocidade da aeronave (SWEETMAN, 1986). Um exemplo bem-sucedido desse equilíbrio é o B-2 Spirit. Com um *design* de asa voadora que melhora a eficiência aerodinâmica, ele também é revestido com MARE, que reduz sua assinatura radar.

### 2.4. Concepção e Desenvolvimento do VANT *Stealth*

A concepção de veículos aéreos não tripulados (VANTs) furtivos é um processo complexo que integra técnicas avançadas de *design* e métodos de engenharia com o objetivo principal de minimizar a visibilidade do veículo aos sistemas de radar. Essa invisibilidade

parcial é alcançada principalmente pela redução da Seção Transversal Radar (RCS), um parâmetro crítico que expressa a capacidade de um objeto de refletir ondas eletromagnéticas e, portanto, ser detectado por radares. Para VANTs, uma baixa assinatura de radar é essencial em aplicações de vigilância e operações militares, onde a furtividade contribui diretamente para a eficiência e a segurança das missões.

A análise do RCS de um VANT pode ser realizada tanto experimentalmente, quanto por meio de simulações numéricas computacionais. Em ambientes experimentais, o VANT é frequentemente avaliado em câmaras anecóicas — estruturas projetadas para eliminar interferências externas e minimizar reflexões internas —, possibilitando a medição precisa da reflexão de ondas eletromagnéticas pelo objeto. Na abordagem computacional, utilizam-se simulações numéricas com métodos como o Método dos Momentos (MoM) e o Método dos Elementos Finitos (FEM), aplicados em *softwares* especializados, como o FEKO, para prever o comportamento eletromagnético do VANT. Essas ferramentas computacionais permitem que os engenheiros testem diferentes geometrias e materiais, ajustando as características da superfície e da estrutura do VANT para alcançar uma RCS reduzida nas bandas de frequência específicas, como as bandas S, C e X, que são de grande interesse para a aplicação *stealth* (LOPES et al., 2023).

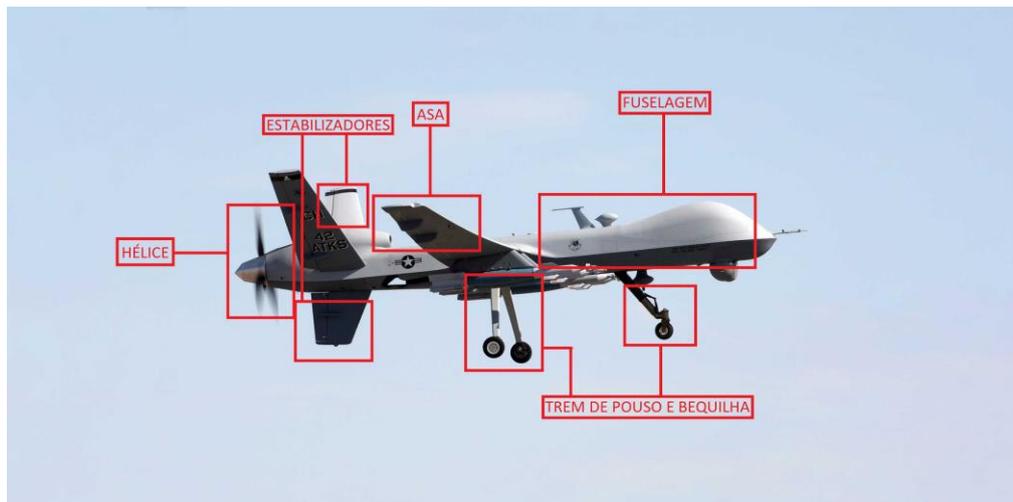
### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1. *Benchmark*

No desenvolvimento de um projeto de uma aeronave, é essencial considerar todas as possibilidades tecnológicas possíveis. Nesse contexto, a realização de uma pesquisa de mercado torna-se indispensável, pois permite categorizar e selecionar as diferentes configurações possíveis para atender às necessidades específicas do projeto.

Para facilitar a seleção das referências, algumas características comuns a esse tipo de aeronave estão ilustradas na Figura 1

**Figura 1. Componentes característicos em VANTs.**



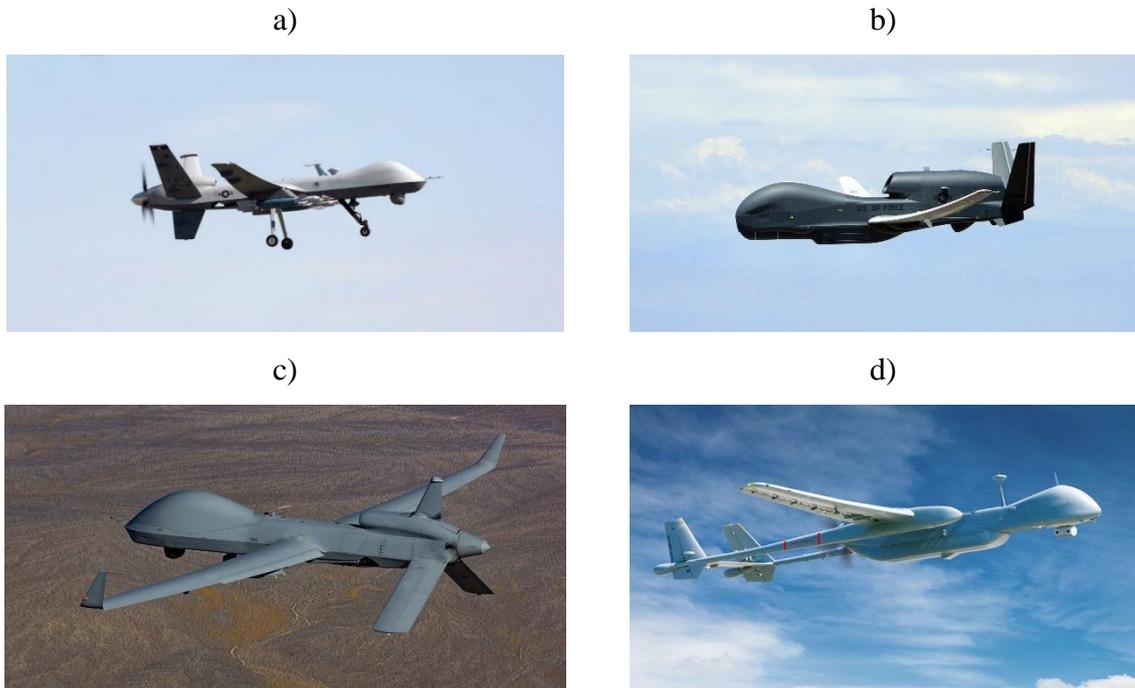
Fonte: Adaptado de Honeywell (2024).

Como é possível observar no modelo *MQ-9A Reaper* da *General Atomics* utilizado como referência na Figura 1, os principais componentes que poderão impactar na geometria e estrutura da aeronave a ser desenvolvida serão:

- Asa;
- Fuselagem;
- Conjunto de estabilizadores horizontais e verticais;

Diversas possibilidades são possíveis quando se trata de projetos de estruturas aeronáuticas, por este motivo foi feito um estudo de casos por meio de comparação de configurações disponíveis no mercado. As aeronaves comparadas foram selecionadas com base em suas tecnologias de mercado, por possuírem características semelhantes, pode-se observar suas configurações na Figura 2.

**Figura 2. Aeronaves para comparação a.) General Atomics MQ-9A Reaper. b.) Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk. c.) General Atomics MQ-1C Gray Eagle. d.) IAI Heron TP.**



Fonte: a) Honeywell (2024). b) *Nothrop Grumman* (2024). c) *General Atomics* (2024). d) *IAI* (2024).

Para estabelecer melhores referências de dimensionamento, foi elaborada a Tabela 1 com o objetivo de comparar os parâmetros dos VANTs. Essa tabela oferece uma visão abrangente das capacidades, dimensões e características de cada modelo, considerando os seguintes parâmetros:

- Envergadura: relacionada ao alcance aerodinâmico, influenciando diretamente a estabilidade e eficiência durante em voo.
- Comprimento e Altura: dimensões que impactam a reflexão das ondas de radar, sendo que *designs* mais compactos tendem a apresentar uma menor RCS.
- Peso e Capacidade de Carga: fatores que determinam os tipos de sensores e sistemas que o VANT pode carregar, influenciando seu alcance e adequação à missão.
- A análise desses parâmetros é fundamental para identificar configurações mais adequadas para aos requisitos furtivos e operação, além de fornecer uma base

comparativa entre tecnologias disponíveis no mercado contribuindo para o desenvolvimento de novos modelos mais eficientes.

**Tabela 1. Comparação entre configurações de VANTs comerciais.**

Especificações	General Atomics MQ-9A Reaper	Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk	General Atomics MQ-1C Gray Eagle	IAI Heron TP
Comprimento (m)	11	14.5	9	14
Envergadura (m)	20	39.9	17	26
Altura (m)	3.81	4.7	2.1	4.5
Peso vazio (kg)	2223	6781	1318	5400
Peso máx de decolagem (kg)	4760	14628	1633	5400
Velocidade Máxima (km/h)	482	575	309	407
Velocidade de Cruzeiro (km/h)	313	500	250	207
Capacidade de carga útil (kg)	1700	1360	680	1000
Autonomia (h)	14	34	42	36
Teto Operacional (m)	15240	18288	8900	14000

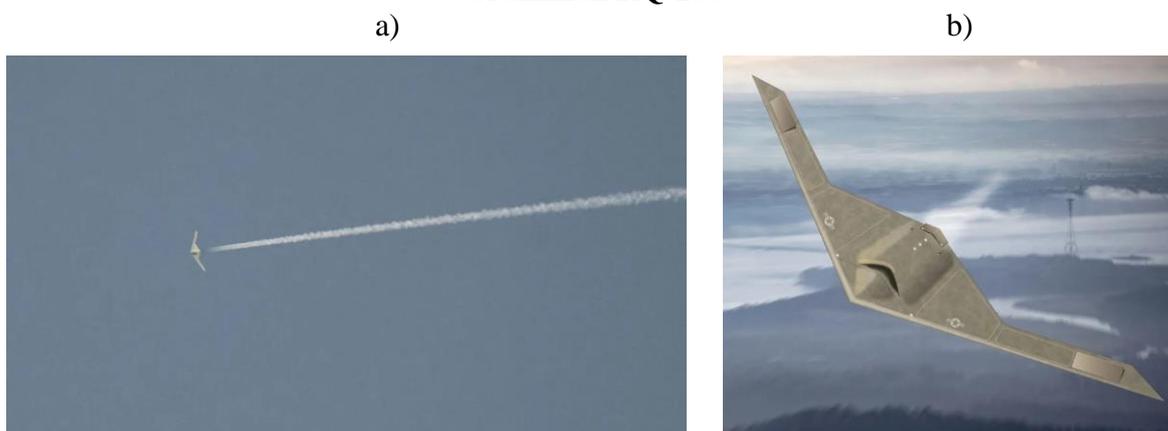
Fonte: Autoras (2024).

A aeronave Northrop Grumman RQ-180 supostamente em desenvolvimento desde 2008, é amplamente reconhecida como um dos UAS mais furtivos da USAF. No entanto, informações detalhadas sobre suas características permanecem escassas devido à natureza sigilosa de suas aplicações. Diversos portais de notícias destacam sua avançada capacidade stealth, reforçando sua relevância no cenário militar moderno.

Em outubro de 2020, o fotógrafo americano Rob Kolinsky capturou uma imagem que se acredita ser do RQ-180, voando a aproximadamente vinte mil pés de altitude. A fotografia apresentada na Figura 3.a, revela um rastro de condensação duplo, indicando que a aeronave seria equipada com dois motores. Essa configuração é significativa, pois motores embutidos ou integrados na fuselagem não apenas contribuem para a redução da assinatura térmica e sonora, mas também podem ser projetados para reduzir a emissão de calor (infravermelho), dificultando sua detecção por sensores infravermelhos e sistemas de rastreamento de calor. Para complementar a análise, a Figura 3.b apresenta uma

representação gráfica da aeronave, oferecendo uma visualização mais detalhada de seu provável design (REVISTA FORÇA AÉREA, 2020).

**Figura 3. Imagens do UAS Northrop Grumman B-2 RQ-180. a) Fotografia capturada por Kolinsky em 2020. b) Representação da aparência e geometria do Northrop Grumman RQ-180.**



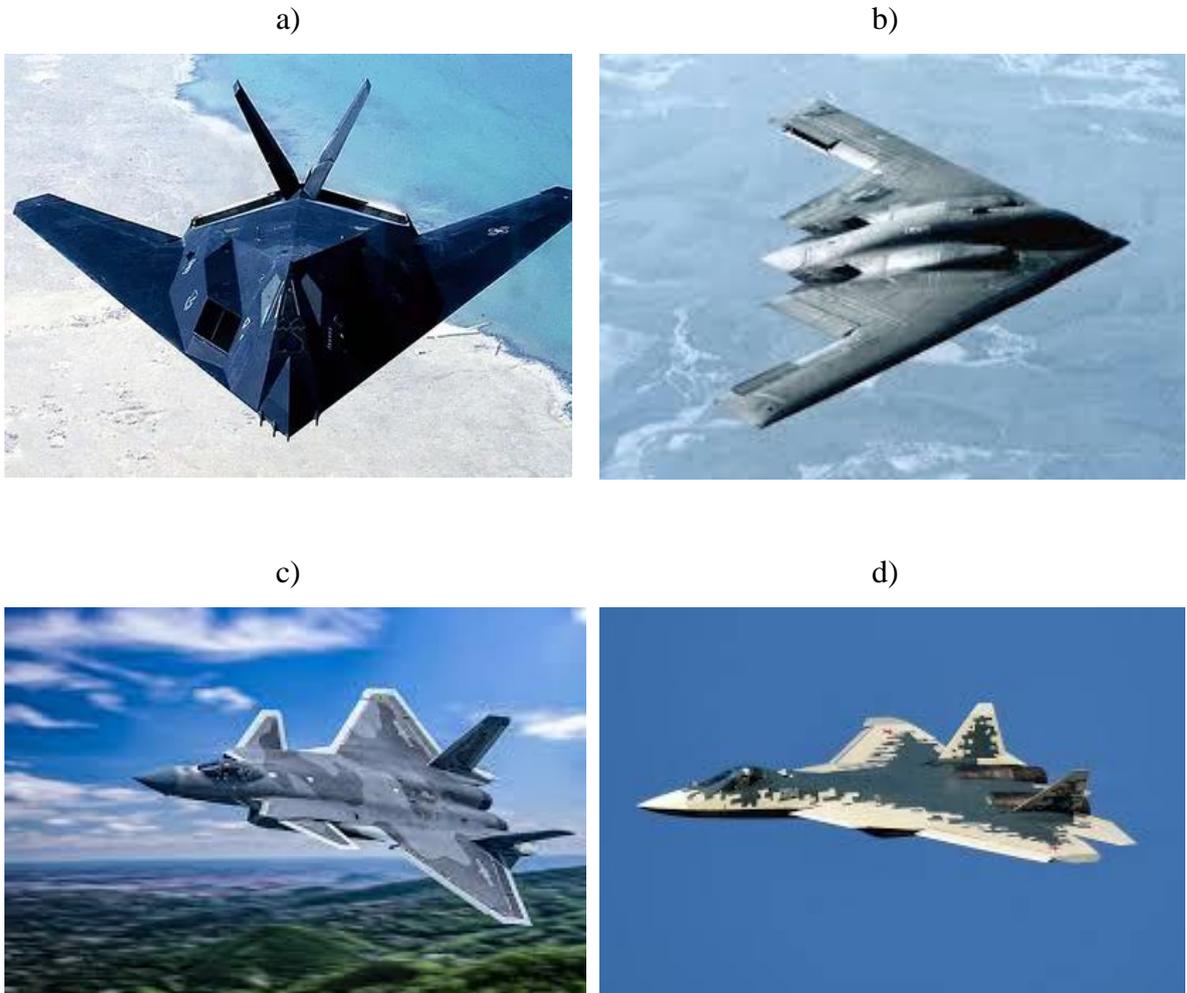
Fonte: a) Aviation Week (2019). b) Revista Força Aérea (2020).

Analisando as características geométricas da aeronave RQ-180, fica evidente a forma triangular e superfícies facetadas, características que são amplamente empregadas em aeronaves furtivas, a necessidade de reduzir os sinais incidentes enviados pelos radares torna imprescindível a presença de uma geometria com ângulos e superfícies que desviem o sinal, evitando ao máximo a reflexão e o espalhamento destas ondas, que ao retornarem ao radar, tornam a aeronave visível (GOMES et al., 2022). Além disso, a configuração de “asa voadora” ou algo similar, elimina superfícies verticais como estabilizadores de cauda, comuns em outras aeronaves. Essa configuração é especialmente vantajosa para aeronaves furtivas, pois superfícies verticais refletem uma maior quantidade de ondas de radar, aumentando a assinatura de radar. A ausência de cauda e estabilizadores verticais torna o perfil da aeronave mais suave e uniforme, contribuindo para a dispersão das ondas de radar e redução da RCS.

Com base nessas características, é possível antecipar que a geometria do RQ-180 apresenta maior afinidade *stealth* em comparação com as aeronaves exibidas na Figura 2. Isso ocorre porque suas superfícies arredondadas e curvadas possuem uma alta capacidade de espalhamento da onda em diferentes direções, dificultando sua detecção.

Para efeito de comparação, a Figura 4 mostra outras aeronaves *stealth* com características geométricas e estruturais parecidas com o RQ-180.

**Figura 4. Aeronaves com geometrias *stealth*. a) Lockheed F-117 Nighthawk. b.) B-2 Spirit. c) Chengdu J-20. d.) Sukhoi Su-57.**



Fonte: a) *Britannica* (2024). b) *Military Power Review* (2024). c) *Simple Flying* (2024). d) *Revista Força Aérea* (2021).

Com base nessas características, torna-se mais viável definir geometrias que apresentem melhores resultados ao longo da pesquisa. A Tabela 2 detalha as especificações das aeronaves apresentadas na Figura 4, conforme informações obtidas em fontes disponíveis na internet.

**Tabela 2. Comparação entre configurações de aeronaves *stealth*.**

Especificações	F-117 Nighthawk	B-2 Spirit	Chengdu J-20	Sukhoi Su-57
Comprimento (m)	20,08	21	20,4	19,8
Envergadura (m)	13,2	52,43	13,5	14
Altura (m)	3,78	5,18	4,45	4,74
Peso vazio (kg)	13,38	71,7	19	18,5
Peso máx de decolagem (kg)	23,8	170,6	37	35
Velocidade Máxima (km/h)	993	1010	2470	2440
Velocidade de Cruzeiro (km/h)	904	900	1960	1800
Capacidade de carga útil (kg)	2,3	18	11	10
Autonomia (km )	1070	11100	5500	3500
Teto Operacional (m)	13716	15200	20000	20000

Fonte: Autoras (2024).

### 3.2. Asa

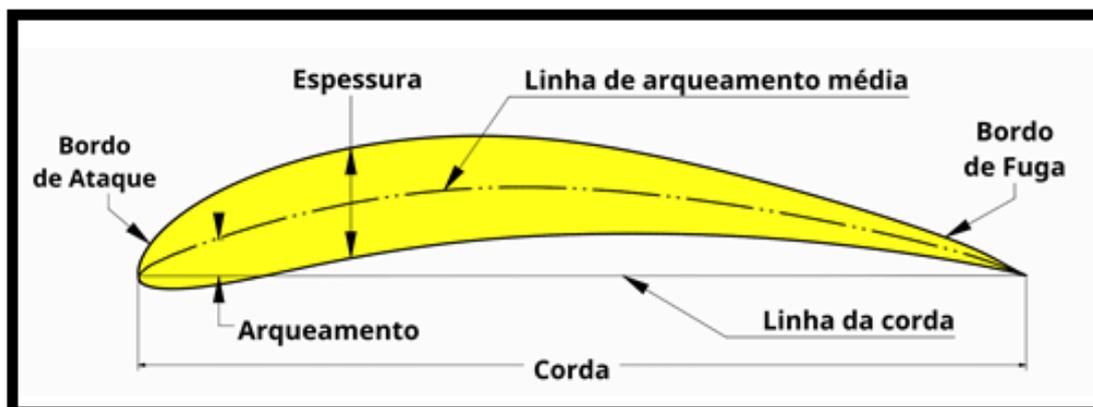
#### 3.2.1. Perfil da Asa

Para definir o perfil a ser utilizado nas geometrias produzidas, é essencial compreender o conceito de perfil aerodinâmico, ou aerofólio. Em relação aos termos utilizados, é importante ressaltar que “perfil aerodinâmico” se refere a qualquer forma ou objeto em interação com o fluxo de ar, porém, “aerofólio” refere-se a um corpo, como a asa de um avião ou a lâmina de uma hélice, projetado especificamente para gerar uma força de reação desejada ao interagir com o ar circundante (DICIO, 2024).

De acordo com Camargo (2018), um perfil aerodinâmico é uma superfície projetada com a finalidade de se obter uma reação aerodinâmica a partir do escoamento do fluido ao seu redor. A Figura 5 ilustra as principais características de um perfil aerodinâmico, facilitando a compreensão e análise.

No contexto de aeronaves furtivas (*stealth*), a escolha do perfil aerodinâmico desempenha um papel fundamental no desempenho e na capacidade de furtividade da aeronave. Em projetos desse tipo, o perfil da asa não apenas gera sustentação, mas também influencia diretamente na assinatura radar e nas características de voo, tornando-se um componente estratégico para o sucesso da aeronave.

**Figura 5. Características de um aerofólio.**



Fonte: Camargo (2018).

A sigla NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) refere-se ao Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica, organização norte-americana predecessora da NASA (National Aeronautics and Space Administration). Durante a década de 1930, a NACA, foi responsável pelo desenvolvimento de perfis aerodinâmicos amplamente utilizados na engenharia aeronáutica, conhecidos como perfis NACA.

Os perfis NACA são divididos em diferentes séries, cada uma com uma nomenclatura baseada em suas características geométricas. Na série de quatro dígitos, por exemplo: o primeiro dígito indica a casa decimal do abaulamento; o segundo dígito representa a posição, em décimos da corda, onde ocorre o abaulamento máximo; e os dois últimos dígitos representam a porcentagem da corda representada pela espessura.

Um exemplo clássico é o perfil NACA 0012, cuja nomenclatura revela as seguintes características: abaulamento: 0%, posição de abaulamento máximo: não aplicável (devido à ausência de abaulamento), espessura máxima: 12%. Essas propriedades tornam o NACA 0012 amplamente utilizado em estudos acadêmicos e experimentos, devido à sua simplicidade e eficiência aerodinâmica (UNICAMP, 2012).

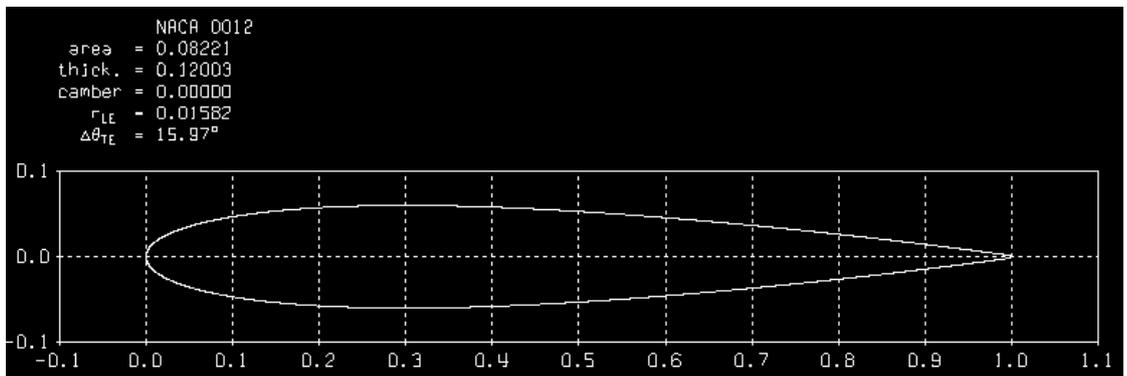
A simetria do NACA 0012 contribui significativamente para a estabilidade em altas velocidades e minimiza o arrasto em diversas condições de voo. Essas características são essenciais para UAVs com aplicação *stealth*, nos quais a redução da assinatura radar é crucial. Por não possuir abaulamento, o perfil gera menor turbulência, o que favorece a redução de ruído aerodinâmico e, conseqüentemente, contribui para uma assinatura radar mais discreta. Além disso, a espessura permite um equilíbrio entre a resistência estrutural da

asa e a minimização de reflexões de radar. Uma asa mais espessa, por exemplo, pode aumentar a resistência ao vento e o RCS, tornando a aeronave mais detectável pelos radares. Já o NACA 0012, com sua espessura moderada, oferece uma geometria que permite a passagem do fluxo de ar de maneira mais linear e controlada, reduzindo a possibilidade de reflexões indesejadas que aumentariam a detecção.

O perfil escolhido para a asa da aeronave foi o NACA 0012, conforme imagem gerada com auxílio do *software* Xfoil, apresentada na Figura 6. Em aeronaves stealth, a escolha do perfil aerodinâmico é um processo crítico, pois é necessário balancear sustentação, estabilidade e furtividade. Perfis simétricos e de baixa espessura, como o NACA 0012, ajudam a reduzir o RCS sem comprometer o desempenho aerodinâmico, contribuindo para que a aeronave permaneça indetectável por radares inimigos enquanto mantém a eficiência de voo.

Por fim, é importante destacar, que a análise e a definição de perfis para aeronaves stealth exigem uma bordagem cuidadosa, considerando os impactos tanto no desempenho aerodinâmico quanto na redução da assinatura eletromagnética. Esse balanceamento é fundamental para evitar comprometer a eficiência de voo ou a furtividade da aeronave.

**Figura 6. Aerofólio NACA 0012.**



Fonte: Xfoil (2024).

### 3.2.2. Aerodinâmica Básica do VANT

Quando o tema em questão é a aerodinâmica de uma aeronave, diversas variáveis e fatores precisam ser analisadas. É importante destacar o caráter acadêmico dos estudos apresentados neste documento, para que os principais aspectos discutidos sejam

devidamente esclarecidos. Entre as propriedades que afetam uma aeronave, destacam-se as forças aerodinâmicas, que exercem um impacto significativo nas estruturas aeronáuticas.

Neste estudo, considera-se uma aeronave operando em condições de voo subsônico. A aerodinâmica subsônica trata o ar como fluido ideal, ou seja, incompressível, sem atrito interno, com escoamento estacionário, irrotacional e não viscoso. A viscosidade nesse contexto, trata-se da propriedade de um fluido que resiste ao movimento relativo entre suas camadas. Assim, as condições analisadas neste estudo seguem os princípios estabelecidos pelo Teorema de Bernoulli (FARIA, 2019).

Para compreender as forças aerodinâmicas, é possível utilizar exemplos ilustrativos como o avião em cruzeiro mostrado na Figura 7. As mesmas forças que atuam em sua também são observadas nos VANTs desenvolvidos neste trabalho, permitindo uma análise comparativa das características aerodinâmicas envolvidas.

**Figura 7. Forças aerodinâmicas.**



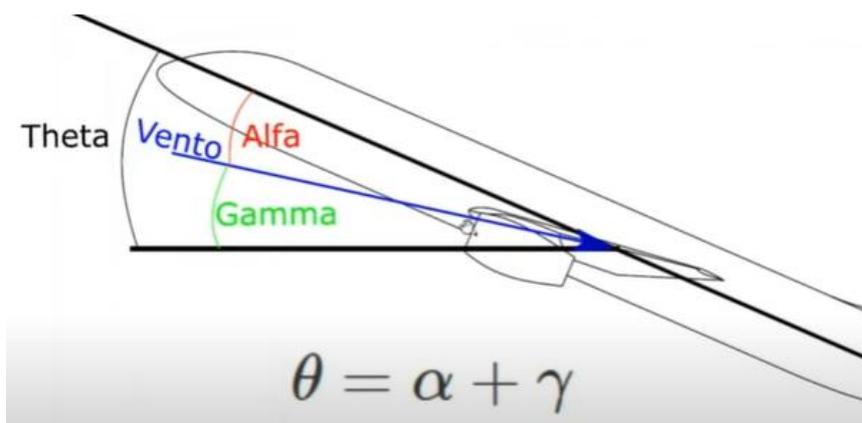
Fonte: Infoenem (2019).

Para entender as forças aeronáuticas que atuam em uma aeronave, é importante entender o que cada uma significa. Em vôo reto e nivelado, a força de sustentação e a força peso precisam estar igualadas, sendo muito importante esta igualdade para a estabilidade em voo. A força de arrasto, ou resistência do ar, é uma força gerada a partir da própria sustentação da aeronave e da massa e geometria de seu corpo. O peso é equivalente a influência física da terra sobre o corpo da aeronave, e a tração é a força que se sobrepõe ao arrasto, o consumo de combustível é necessário para a propulsão da aeronave, gerando a tração. Analisando o caso da aeronave em voo estável de cruzeiro nivelado, as forças

atuantes em toda a estrutura geram um momento no centro de gravidade da aeronave, que no caso desta condição de voo, a soma de momentos é nula (ENGENHARIA AERONÁUTICA, 2023).

Outro importante dado para a concepção da aeronave são seus ângulos de incidência em relação a terra, o ângulo theta é o ângulo do eixo da aeronave em relação a terra, este é composto pelos ângulos alfa e gama, que são, respectivamente, o ângulo do eixo da aeronave em relação ao fluxo de ar incidente, e o ângulo entre o fluxo de ar incidente e a terra, estes ângulos são muito importantes na operação da aeronave devido a ação que eles têm sobre a estrutura, por exemplo em uma situação de decolagem o ângulo theta se torna positivo, e em uma situação de pouso o ângulo theta se torna negativo (ENGENHARIA AERONÁUTICA, 2023). A Figura 8 apresenta uma ilustração dos ângulos aerodinâmicos incidentes.

**Figura 8. Forças Atuantes na Aeronave.**



Fonte: Adaptado de Engenharia Aeronáutica (2023).

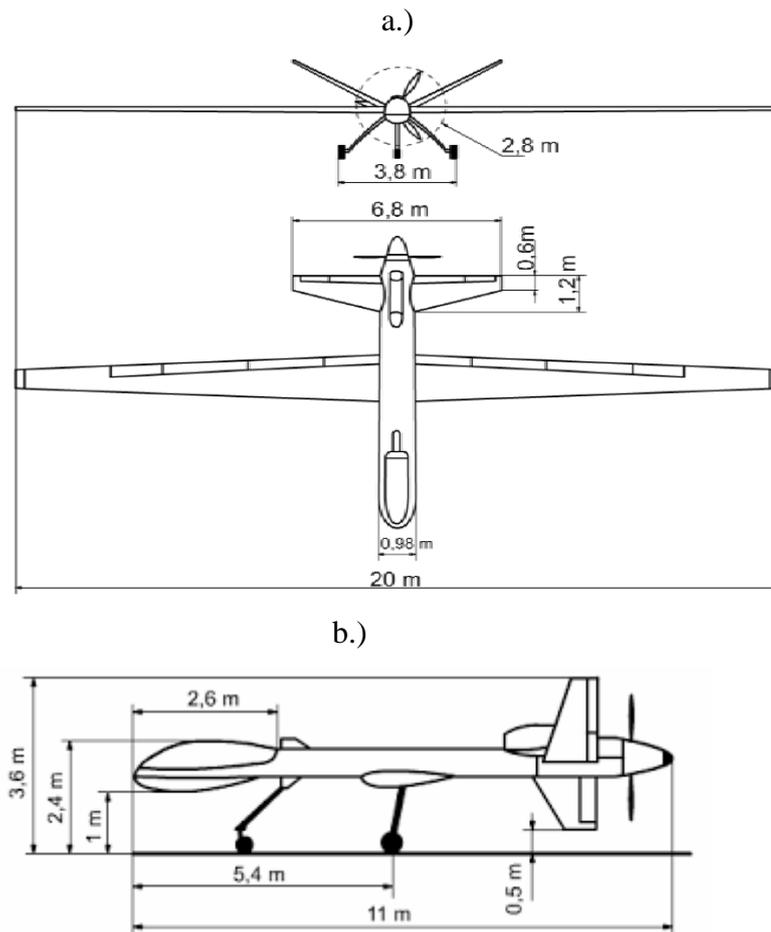
### 3.3. Dimensionamento Estrutural

No dimensionamento estrutural deste trabalho, o foco está exclusivamente na escolha da geometria, sem análise de cargas estruturais ou forças atuantes. Para isso, é realizada uma análise comparativa com UAVs semelhantes, como o *MQ-9A Reaper*, a fim de identificar as características geométricas que atendem aos requisitos de furtividade e desempenho aerodinâmico de forma otimizada. O dimensionamento estrutural da primeira configuração escolhida foi baseado nas referências citadas no item 3.1 deste documento.

A definição das dimensões, formatos e posicionamento de componentes como fuselagem, asas, estabilizadores e trem de pouso, segue parâmetros projetados para favorecer a redução da assinatura radar e a eficiência aerodinâmica. Aspectos como ângulos e proporções são escolhidos para minimizar o RCS e facilitar a integração de sistemas *stealth*, mantendo o *design* simplificado e funcional.

A Figura 9 ilustra as vistas 2D do *MQ-9A Reaper* sendo que a Figura 9.a apresenta a vista frontal e superior e a Figura 9.b apresenta a vista lateral direita, que servem como referência visual para orientar a configuração geométrica da estrutura do primeiro VANT a ser analisado. Essas vistas auxiliam na escolha do layout e proporções gerais, elementos que são essenciais para uma concepção aerodinâmica alinhada às metas de furtividade do projeto.

**Figura 9. Dimensões do MQ-9A Reaper para utilizar como referência. a) Vista frontal e superior. b) Vista lateral direita.**



Fonte: Beño (2014).

Para definir as dimensões da geometria Shadowhawk, foram analisadas as características de diferentes UAVs disponíveis no mercado, com foco nas configurações que apresentassem desempenho adequado para as missões *stealth*. O *MQ-9A Reaper* foi escolhido como uma referência principal, devido às suas dimensões e características amplamente utilizadas em UAVs militares de longa autonomia. Além disso, outras configurações foram exploradas para permitir uma comparação abrangente entre aeronaves de características similares.

A escolha da configuração do Shadowhawk foi fundamentada em uma análise das dimensões e proporções que favorecessem uma assinatura radar minimizada, sem comprometer a estabilidade e a eficiência aerodinâmica. O objetivo foi selecionar uma geometria que equilibrasse furtividade e funcionalidade, adaptando-se a um perfil de missão específico.

A Tabela 3 apresenta as principais dimensões definidas para o modelo Shadowhawk, elaboradas a partir da comparação direta com UAVs como o *MQ-9A Reaper*, e considerando o objetivo de desenvolver um VANT com aplicação *stealth*. Esses parâmetros foram ajustados com base na missão proposta, que envolve operações que demandam baixa detectabilidade por radar, capacidade de operar em altitudes variadas, realização de reconhecimento e vigilância de longo alcance, além de ataques de precisão utilizando armamentos inteligentes.

**Tabela 3. Dimensões da geometria da aeronave *Shadowhawk*.**

Especificações	Shadowhawk
Comprimento (m)	12
Envergadura (m)	26
Altura (m)	4

Fonte: Autoras (2024).

A segunda geometria, denominada “Thor”, baseada no F-117 Nighthawk, foi definida com base na redução da assinatura radar, adotando um *design* angular com superfícies planas e ângulos agudos. Em comparação com a primeira geometria, Shadowhawk, ela apresenta um *design* mais eficiente para os requisitos furtividade. Diferentemente da Shadowhawk que utiliza superfícies arredondadas que aumentam a

refletividade e facilitam a detecção por radar, a geometria de Thor elimina essas características, favorecendo a dispersão de ondas eletromagnéticas. As dimensões que podem ser encontradas na Tabela 4, assim como suas características principais foram definidas com base em sua comprovada eficácia como aeronave *stealth*.

**Tabela 4. Dimensões da geometria da aeronave Thor.**

Especificações	Thor
Comprimento (m)	21
Envergadura (m)	30
Altura (m)	5

Fonte: Autoras (2024).

A Terceira geometria, baseada no Sukhoi Su-57, foi projetada considerando as características e capacidades do caça de quinta geração desenvolvido pela Rússia. O Sukhoi Su-57 é um caça multifuncional, *stealth*, projetado para missões de ataque, interceptação e superioridade aérea, com ênfase na redução da assinatura radar e no aumento da eficiência em combate. Essa aeronave representa uma combinação equilibrada de furtividade, performance aerodinâmica e flexibilidade missionária.

A geometria angular e otimizada do Sukhoi Su-57, juntamente com o uso de materiais modernos e o design avançado das asas, serve como referência para criar uma configuração ideal para um VANT. Essa configuração busca atender à demanda por alta eficiência em missões furtivas, sem comprometer o desempenho ou a manobrabilidade, um dos maiores desafios na concepção de aeronaves *stealth*.

Ao adaptar essas características para um VANT, o projeto tem como objetivo maximizar a eficiência operacional e a furtividade em diferentes contextos de missão, alinhando-se aos propósitos de seu desenvolvimento. As dimensões da geometria Hidden Viper podem ser encontradas na Tabela 5.

**Tabela 5. Dimensões da geometria da aeronave *Hidden Viper*.**

Especificações	Hidden Viper
Comprimento (m)	19
Envergadura (m)	14
Altura (m)	7

Fonte: Autoras (2024).

Logo, no decorrer do documento, pode-se notar a importância da definição dessas três geometrias citadas neste capítulo, para no fim aplicar os resultados obtidos nas simulações delas para gerar a geometria final deste projeto, o *Nautilus*.

### 3.4. Missões Definidas

Para definir a missão de cada configuração, é importante considerar suas aplicações e objetivos, enquanto a geometria *Shadowhawk* é inspirada na aeronave *MQ-9A Reaper*, suas características e aplicações não são as mesmas da geometria *Thor*, inspirada na aeronave RQ-180.

- Missão principal *Shadowhawk*: Coleta de informações para apoio em missões de ataque por meio de equipamento de inteligência, vigilância e reconhecimento.
- Missão Secundária *Shadowhawk*: Apoio aéreo, busca e salvamento de combate, ataque de precisão e marcação de alvos.
- Missão Principal *Thor*: Destruição de alvos críticos, operações em ambientes fortemente defendidos com risco de detecção e defesa, ataque noturno, ataques de precisão.
- Missão Secundária *Thor*: Supressão de defesa aérea (SEAD), reconhecimento estratégico, interferência eletrônica.
- Missão Principal *Hidden Viper*: Ataques de precisão, destruição de alvos de alto valor, infiltração furtiva, monitoramento estratégico.
- Missão Secundária *Hidden Viper*: Reconhecimento prolongado, apoio aéreo, interferência eletrônica, ataques noturnos.

Podemos perceber que quando comparados os objetivos das duas configurações diferentes, a *Shadowhawk* se posiciona especialmente como equipamento de inteligência e coleta de informações, o que não significa que não possa possuir equipamento de combate. Enquanto isso, a configuração *Thor e Hidden viper* se apresentam em suma como aeronaves de ataque e defesa, sendo aplicada em contextos que necessitam fortemente de baixa detecção por radares inimigos.

Portanto, definiu-se a missão da geometria final, *Nautilus*, de acordo com as maiores necessidades no mercado de VANT's.

- Missão Principal *Nautilus*: Infiltração furtiva, destruição de alvos críticos, vigilância estratégica, ataques de precisão.
- Missão Secundária *Nautilus*: Reconhecimento avançado, resgates, interferência em defesa aérea, SEAD, guerra eletrônica.

### 3.5. Comportamento Eletromagnético

A transmissão de informações por meio de ondas eletromagnéticas a longas distâncias representa um marco crucial no desenvolvimento tecnológico da humanidade. Essa capacidade permitiu a evolução de diversas operações e invenções tecnológicas que, até então, eram inimagináveis. Com a utilização de sistemas de comunicação via satélite e a implementação de radares, tornou-se possível a detecção e monitoramento de objetos em áreas distantes. No contexto militar e aeroespacial, essa detecção ocorre, principalmente, por meio da Seção Reta Radar (Radar Cross Section - RCS), um parâmetro fundamental na caracterização de alvos por radar (YAMAMOTO, 2014).

A RCS descreve a intensidade das ondas de radiação eletromagnéticas refletidas por um objeto quando interagem com sua superfície, passando por um processo de espalhamento. Nesse processo, as ondas emitidas pelos radares são refletidas pelo objeto e retornam ao sistema de detecção, sendo essa reflexão essencial para a identificação e análise do alvo. O processo de espalhamento ocorre em função das propriedades da superfície do objeto, cada uma dessas características pode influenciar significativamente a quantidade de energia refletida, afetando diretamente a capacidade do radar de detectar e identificar o objeto. Em aeronaves, essa reflexão pode ser tão precisa que, ao analisar o padrão de energia

refletida, é possível até identificar o modelo da aeronave, criando uma espécie de "digital" única para cada objeto detectado (LOPES, 2022).

Para facilitar a comparação entre diferentes objetos ou alvos, utiliza-se a Seção Reta Radar Normalizada (Normalized Radar Cross Section - NRCS). Essa medida padronizada permite quantificar a eficiência da reflexão radar considerando a área efetiva do objeto e sua capacidade de dispersão de energia. A NRCS é especialmente relevante em tecnologias de furtividade (*stealth*), onde o objetivo é minimizar essa medida para reduzir a visibilidade do objeto nos radares. Além disso, a energia refletida e transmitida aos sistemas de sensoriamento depende de diversos fatores, como a geometria, dimensão, rugosidade e o material (composição) da superfície. Dessa forma, a NRCS oferece uma medida padronizada para avaliar a eficácia da interação de objetos com ondas eletromagnéticas. (AEROENGENHARIA, 2024).

Os radares de busca e os radares de monitoramento, operam predominantemente em bandas de alta frequência, como S, C e X, assim como a Tabela 6 mostra. Essas bandas são preferidas devido à sua capacidade de oferecer alta resolução e precisão na detecção de objetos, o que é crucial em operações de monitoramento e rastreamento. Cada uma dessas bandas possui características distintas que influenciam o desempenho do radar. Por exemplo, a banda S é eficiente para monitoramento de longa distância, enquanto a banda X oferece alta resolução para objetos menores ou mais distantes, sendo mais eficaz em ambientes de alta precisão. Já a banda C é geralmente usada em condições de ambiente adverso, como em clima ruim ou com interferência.

O RCS, e mais especificamente a NRCS, tornam-se então parâmetros essenciais não apenas para a detecção de objetos, mas também para a definição de estratégias de defesa e ataque, particularmente no contexto de aeronaves e outros sistemas de plataformas móveis que devem operar em ambientes de alta ameaça e alta visibilidade radar. O avanço nas tecnologias de furtividade, como o uso de materiais absorventes de radar (RAM) e geometria otimizada para dispersão mínima, busca reduzir a NRCS de plataformas e garantir sua invisibilidade ou, no mínimo, reduzir sua assinatura radar.

Portanto, a interação das ondas de radar com a superfície dos objetos e os parâmetros que determinam a reflexão dessa energia são fundamentais para a identificação e análise de alvos em sistemas de detecção, possibilitando não apenas a localização, mas também a identificação e classificação dos objetos.

**Tabela 6. Bandas de radar e seus alcances**

<b>Banda de frequência</b>	<b>Alcance de frequência (GHz)</b>
L	1-2
<b>S</b>	<b>2-4</b>
<b>C</b>	<b>4-8</b>
<b>X</b>	<b>8-12</b>
Ku	12-18
K	18-24
Ka	24-40
V	40-75
W	75-110

Fonte: Adaptado de SEQUEIRA, V. (2018).

O conceito da RCS é estruturado de acordo com o fato de que nem toda energia radiada incide sobre o alvo, é importante levantar fatores que demonstram esta ideia. A RCS de um objeto é entendida como o produto de três fatores importantes demonstrados na Equação 1:

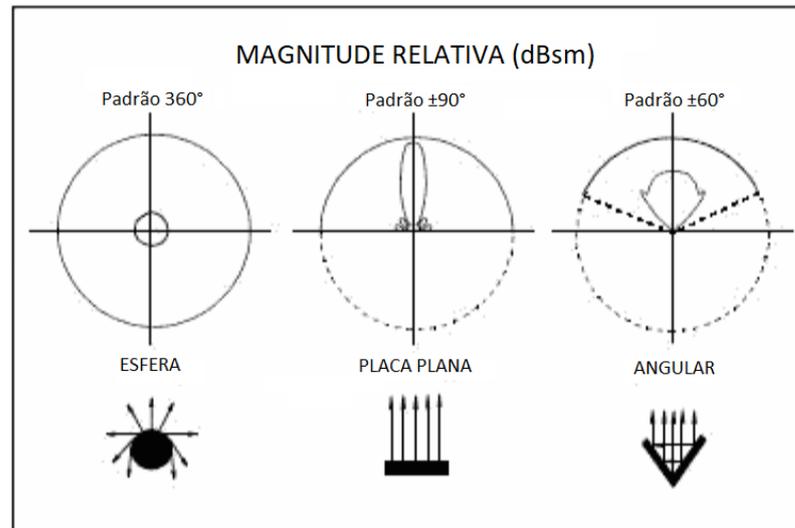
$$\sigma = \text{Seção transversal projetada} \times \text{Refletividade} \times \text{Diretividade} \quad (1)$$

sendo que, o símbolo  $\sigma$  representa o RCS de um objeto, a refletividade é a porcentagem de sinal refletido para o radar em relação ao sinal inicialmente transmitido pelo radar, e a diretividade é a potência refletida na direção do radar em relação a potência que teria sido retrodifundida caso a dispersão fosse igual em todas as direções. Experimentalmente este retorno do sinal incidente é comparado com o de uma esfera que tem uma área frontal de 1 metro quadrado, essa comparação ajuda a entender melhor como funciona o espalhamento, além de ajudar nas medições em campo e em laboratórios, devido ao fato de que independentemente da posição em que a esfera estiver, os sinais refletidos são os mesmos, não afetando a intensidade do RCS.

Os padrões de RCS são diferentes para cada tipo de geometria, como pode ser observado na Figura 10, em que se demonstra a assinatura de diferentes formas quando girados em torno de um eixo vertical, a esfera possui o mesmo RCS em todas as direções,

enquanto a placa plana quase não emite sinal de RCS, a não ser quando está em uma posição específica alinhada diretamente ao radar.

**Figura 10. Padrões de RCS.**



Fonte: Adaptado de Navair (2013).

Em relação aos radares, o radar monoestático é aquele que transmite a onda, ou então pode ser dito que “ilumina” o objeto, e a onda eletromagnética é recebida no mesmo radar, já o radar biestático envia a onda por meio de um transmissor, sendo que um ou mais radares recebem a onda de forma oblíqua a radiação espalhada (MASSAMBANI, 2024).

### 3.6. Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética

Com a rápida evolução da ciência e tecnologia, especialmente no desenvolvimento de equipamentos que utilizam transmissão de sinais por redes eletromagnéticas, os MARE têm ganhado destaque em aplicações avançadas. Esses materiais são amplamente aplicados em estruturas aeronáuticas militares, com finalidade de reduzir a assinatura ao radar, que é o foco deste estudo. Além disso com a chegada do 5G e aumento da poluição eletromagnética nas áreas urbanas, os MARE também têm sido empregados para mitigar interferências e minimizar os efeitos da poluição eletromagnética (CUNHA et al., 2023).

Os MARE funcionam transformando a energia das ondas eletromagnéticas em calor, principalmente por meio de efeito joule. O fenômeno de múltiplas reflexões dentro do material também contribui para esse processo de absorção. Para compreender melhor o

funcionamento e as aplicações desses materiais, serão apresentadas algumas fórmulas relacionadas ao cálculo de suas propriedades eletromagnéticas. Essas propriedades são essenciais para entender o comportamento dos MARE em suas diversas aplicações.

A eficiência de atenuação desses materiais é avaliada por meio de ensaios de transmissão e reflexão, utilizando o método Nicolson, Ross e Weir (NRW). Esses ensaios empregam equipamentos específicos, como Analisador Vetorial de Redes (VNA do inglês *Vector Network Analyzer*) que mede os parâmetros de espalhamento S ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ ) (DE AZARA; DOS SANTOS POUZADA e DE TOLOSA, 2019). Esses parâmetros são usados para calcular propriedades fundamentais dos materiais, como absorbância, transmitância e reflectância (ANTUNES, 2024). O cálculo da absorbância, em particular, é apresentado na Equação 2.

$$A = 1 - R - T \quad (2)$$

sendo que A se refere a absorbância, R é a reflectância e T a transmitância. A equação 3 representa o cálculo que é utilizado para se obter reflectância.

$$R = |S_{11}|^2 \quad (3)$$

sendo que R representa a reflectância. A Equação 4 representa o cálculo para a transmitância.

$$T = |S_{21}|^2 \quad (4)$$

O uso de MARE em estruturas aeronáuticas é uma das principais técnicas para a atenuação de sinais de radar. Esses materiais são geralmente aplicados sobre superfícies refletoras, reduzindo a assinatura radar da aeronave. No entanto, em aeronaves equipadas com radar, como no caso do radome, a aplicação de MARE não é viável, pois interfere no funcionamento correto do sistema (COELHO, L. V.; ANDRADE, L. A. e REZENDE, M. C., 2009). Por esse motivo, os MARE são estrategicamente aplicados apenas em pontos críticos, combinando-se com técnicas de modelagem de superfície e simulações computacionais para maximizar a furtividade.

Existem diferentes tipos de materiais absorvedores que podem ser utilizados, incluindo compósitos a base de silicone, plásticos e até tintas. A escolha do material absorvedor deve levar em conta suas propriedades e a aplicação pretendida. De maneira geral, os MARE podem ser classificados em duas categorias principais: absorvedores dielétricos e os absorvedores magnéticos. Os absorvedores dielétricos são geralmente compostos por matrizes poliméricas que incorporam partículas de carbono, grafite ou metais

em pó. Já os absorvedores magnéticos utilizam aditivos com propriedades magnéticas, como ferritas, para atenuar a radiação (DE CASTRO, D. J. et al., 2000).

De acordo com Lopes (2020), um compósito baseado em uma matriz de silicone dielétrica e ferrocarbonila como aditivo, apresentou um pico de absorção de 99,6% em uma frequência de 9,6 GHz para uma amostra de 2mm de espessura. Em comparação, outro compósito feito com a mesma matriz de silicone, mas utilizando Ferrita de Manganês e Zinco (MnZn) como aditivo, obteve um pico de absorção de 98% em uma frequência de 9,5 GHz, também, para uma espessura de 2mm. Esses dados evidenciam um compósito a base de silicone dielétrico e ferrocarbonila pode ser altamente eficiente como MARE, atenuando uma quantidade significativa de radiação eletromagnética. Além disso, o material apresenta a vantagem de ser extremamente leve, com possibilidade de fabricação em espessuras reduzidas, como a mencionada.

Dessa forma, este estudo considera que o compósito a base de ferrocarbonila representa a melhor opção entre os materiais analisados. Sua aplicação na geometria final desenvolvida no presente trabalho se mostra promissora, contribuindo para a redução da assinatura radar da aeronave com eficiência e leveza.

### 3.7. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi adotada uma abordagem computacional detalhada para analisar e definir as assinaturas radar das geometrias projetadas. Para a realização das simulações de *Radar Cross Section* (RCS) foi utilizado o *software* FEKO® (*Feldberechnung für Körper mit beliebiger Oberfläche*), cuja tradução do acrônimo alemão significa “cálculos de campo envolvendo corpos de forma arbitrária” (MEDIUM, 2020). Trata-se de um software amplamente reconhecido pela sua robustez na análise eletromagnética e ideal para a avaliação de assinaturas radar de geometrias complexas, como as desenvolvidas neste estudo. Sua capacidade avançada de modelagem e simulação de interações de ondas eletromagnéticas com superfícies de formas variadas, torna-o uma ferramenta essencial para análise mais detalhadas e precisas.

- Desenvolvimento das Geometrias

As geometrias analisadas foram desenvolvidas utilizando o *software* CATIA V5, da Dassault Systèmes, com foco no módulo de *design* “*Generative Shape Design*”. Este módulo

é amplamente reconhecido por sua eficiência na criação de modelos tridimensionais de superfícies complexas, especialmente aquelas que requerem alta precisão e características aerodinâmicas. A escolha do CATIA V5 foi fundamentada em sua flexibilidade no processo de design e na capacidade de manipular, com detalhes, curvas e superfícies essenciais para representar com precisão as geometrias das aeronaves, otimizadas para a minimização da assinatura radar.

- Perfis Aerodinâmicos

Para a definição do perfil aerodinâmico utilizado na geometria Shadowhawk, foi empregado o *software* XFOIL. Amplamente empregada em estudos de aerodinâmica, o XFOIL é uma ferramenta reconhecida por sua eficácia na análise e seleção de perfis de asas.

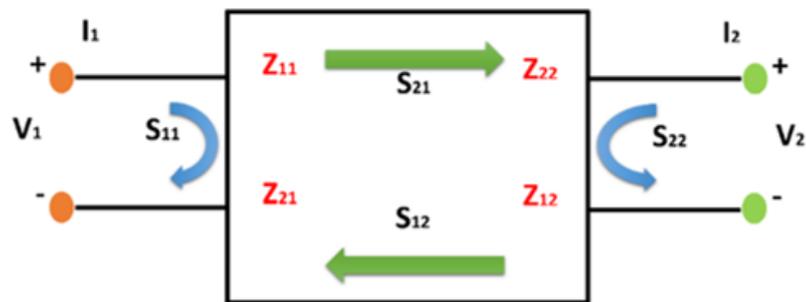
- Análise de Materiais e Caracterização Eletromagnética

Para análise de materiais, é necessário entender as propriedades eletromagnéticas dos materiais, que podem ser caracterizadas através de medições com um VNA (*Vector Network Analyzer*). Este equipamento de alta precisão, localizado no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), no Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), é capaz de medir a reflexão e transmissão das ondas eletromagnéticas nos compósitos. A primeira etapa do processo envolveu o uso do *software* Origin, uma plataforma de análise e plotagem de dados, amplamente utilizada para a construção de gráficos de alta qualidade. O Origin foi utilizado para processar os dados experimentais e numéricos obtidos do compósito fibra-carbono, gerando representações gráficas claras e detalhadas. Essas visualizações facilitaram a comparação e a interpretação das respostas da amostra nas medidas de absorvância, refletância e transmitância.

O VNA permite a obtenção de parâmetros como os coeficiente de reflexão, e transmissão, além da permissividade complexa dos materiais. Esses dados são essenciais para a modelagem da interação entre os materiais e as ondas radar. As medições realizadas com o VNA desempenham um papel crucial na utilização do compósito de fibra de carbono com resina epóxi na análise de RCS, uma vez que para realizar a análise, é necessário um material refletor. Uma dessas medições é Parâmetro-S, definido como parâmetro de espalhamento da onda eletromagnética emitida em uma determinada amostra. A onda eletromagnética ao interagir com o material irá gerar 2 sinais de resposta devido aos fenômenos de reflexão e transmissão. O termo é referente a parcela da energia emitida e

refletida na porta 1, enquanto o parâmetro refere-se a energia transmitida pela porta 1 e recebida na porta 2, ou seja, essa parcela de energia é resultado da transmissão da onda através do material analisado (Karimi et al., 2016). De forma similar, o sinal emitido pela porta 2 também é analisado devido aos fenômenos de reflexão e transmissão. A Figura 11 apresenta uma esquematização deste comportamento para melhor visualização.

**Figura 11. Representação esquemática dos sinais referentes ao parâmetro S dentro de um guia de onda.**



Fonte: Lopes (2020).

A Figura 12 apresenta o equipamento VNA localizado no INPE, utilizado para caracterização NRW do compósito fibra-carbono.

**Figura 12. a) Portas acopladas ao equipamento VNA. b) Guia de ondas. c) Conjunto de equipamentos acoplados ao VNA.**



Fonte: Autoras (2024).

A combinação dessas ferramentas de *software* e equipamentos experimentais proporcionou uma análise aprofundada das assinaturas radar das geometrias projetadas, considerando tanto as propriedades geométricas das superfícies quanto às características dos materiais absorvedores. O uso do FEKO® para simulação, do CATIA V5 para design, do

XFOIL para os perfis, e do VNA para caracterização dos materiais, garantiu uma abordagem completa e precisa para o desenvolvimento das geometrias com baixas assinaturas radar.

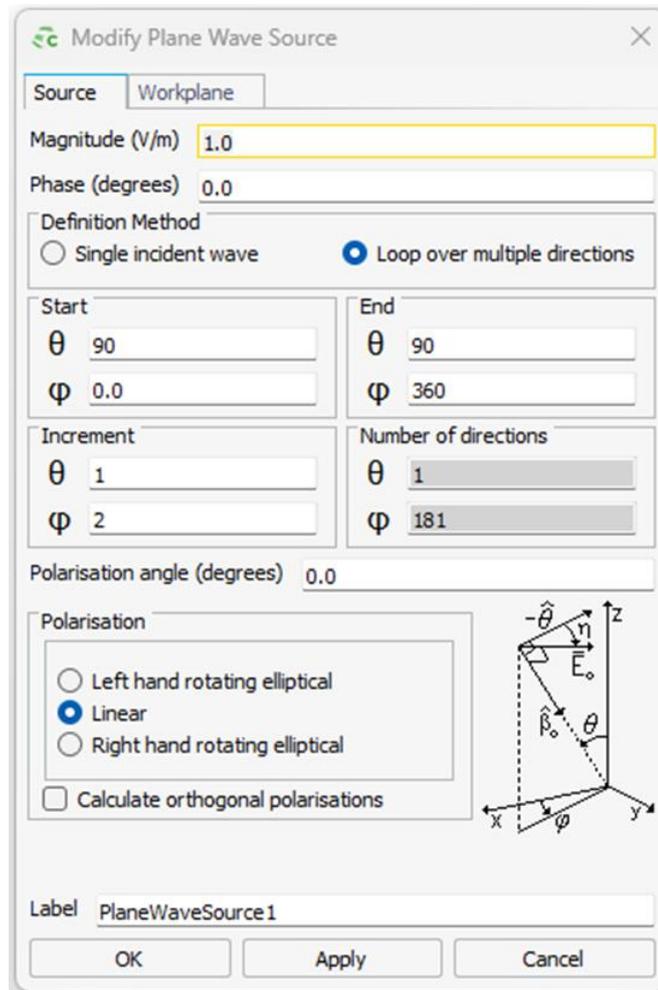
### 3.8. Simulação no *Software FEKO®* e Caracterização do Compósito Fibra-carbono

É essencial conhecer as ferramentas adequadas para atender às necessidades de um projeto. Quando o objetivo está claramente definido, torna-se mais fácil determinar o caminho a ser seguido. No presente estudo, o objetivo de verificar o comportamento das configurações desenhadas em relação ao RCS, nas frequências centrais das bandas S, C e X, será alcançado utilizando o *software* de simulação FEKO® desenvolvido pela empresa ALTAIR®.

O FEKO® é um programa computacional de engenharia utilizado em diversas indústrias, como as dos setores aeroespacial, automotivo, de comunicação e de produtos eletrônicos. Entre suas aplicações destacam-se: a garantia da compatibilidade eletromagnética de componentes, a simulação de montagem e funcionamento de antenas, a análise de distribuição de redes em cidades, campus, edifícios e nações, o gerenciamento do espectro de sistemas sem fio, e a análise de desempenho de reflexão de objetos submetido a sinais incidentes. Uma de suas funções mais relevantes para este trabalho é a capacidade de realizar simulações da RCS, conforme destacado por (ALTAIR, 2020).

Para a simulação da RCS das geometrias projetadas, as aeronaves foram inicialmente modeladas no *software* de design 3D CATIA V5. Posteriormente, os modelos 3D foram convertidos do formato “CATpart” para o formato “.stp”, garantindo a compatibilidade com o FEKO®. As simulações foram realizadas nas frequências centrais das bandas de interesse: banda S (2-4 GHz, com frequência central de 3 GHz), banda C (4-8 GHz, com frequência central de 6 GHz) e banda X (8-12 GHz, com frequência central de 10 GHz). Adicionalmente, as configurações no software incluíram a definição das direções e ângulos das ondas eletromagnéticas incidentes, conforme ilustrado na Figura 13. Essa etapa foi fundamental para garantir a precisão e a representatividade dos resultados obtidos.

**Figura 13. Escolha das direções do sinal incidente.**



Fonte: Autoras (2024).

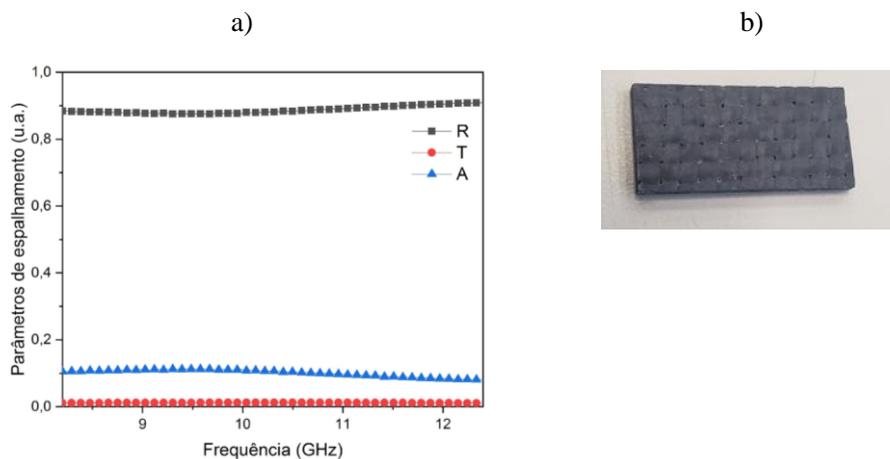
O material utilizado como parâmetro para as simulações realizadas no software foi a fibra de carbono. Este material apresenta diversas vantagens quando utilizadas como base para as superfícies simuladas. Laminados de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC) estão entre os mais utilizados na indústria aeronáutica, sendo amplamente aplicados em diversas partes de aeronaves como fuselagem, estabilizadores e componentes internos. Essa popularidade deve-se as características vantajosas do material, como a excelente relação entre resistência e leveza, contribuindo para a redução do peso total da aeronave, um fator crucial no projeto de estruturas aeronáuticas (TREVISAN et al., 2023). No contexto das simulações no FEKO®, a fibra de carbono apresenta propriedades de reflexão muito parecidas às dos materiais metálicos, refletindo quase 100% do sinal incidente. Essa característica é vantajosa no presente estudo, pois garante uma alta reflexão dos sinais aos

radares na simulação, de forma que seja analisado precisamente os efeitos das geometrias complexas no RCS das aeronaves.

Desta forma, as propriedades da fibra de carbono foram incorporadas nas configurações do software FEKO®. Para efeito de comparação com valores reais, foi fabricada uma amostra de laminado de fibra de carbono com resina epóxi em proporção mássica de 2:1 (duas proporções de fibra para 1 de resina). A amostra foi produzida com as dimensões do guia de ondas retangular da banda X (22,9 mm x 10,2 mm) e espessura de 9.77 mm, sendo acoplado ao VNA.

A Figura 14.a mostra os resultados dos parâmetros de espalhamento obtidos a partir da medição da amostra, enquanto a Figura 14.b exibe a amostra produzida para este experimento.

**Figura 14. Amostra de laminado de PRFC produzida e simulada no VNA. a) Parâmetros de espalhamento do PRFC medidas no VNA. b) Amostra de PRFC produzida.**



Fonte: Autoras (2024).

Com a caracterização eletromagnética feita do compósito podemos mostrar que a fibra de carbono possui alto índice de reflexão ( $R \approx 90\%$ ) possibilitando em estudos utilizar o material como PEC (*perfect electric conductor*  $R \approx 100\%$ ) no FEKO®. Contudo, para conceitos práticos, a diferença em R deve ser cuidadosamente estudada e considerada em geometrias complexas para o cálculo preciso da RCS.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise das Geometrias Projetadas

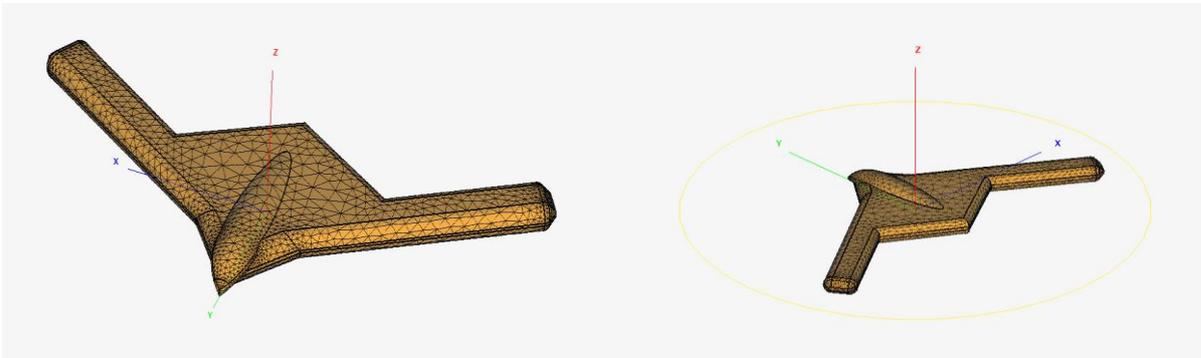
Com base nas aeronaves mencionadas no item 3.1 (*Benchmark*), utilizadas como referência para a definição geométrica e dimensional, foram desenvolvidas três geometrias principais no software CATIA V5, além de uma quarta geometria final, criada com base no desempenho das três anteriores. Antes da validação dessas quatro geometrias projetadas, foi realizada a modelagem de uma geometria inicial para um pré estudo de *softwares* e configuração. Essa geometria inicial teve caráter exclusivamente experimental e, não será incluída nas análises finais do projeto.

É importante destacar que este trabalho não tem como objetivo projetar geometrias completamente novas, exceto a última, denominada de *Nautilus*. As demais foram baseadas em opções já disponíveis no mercado e nas referências analisadas no item 3.1 *Benchmark*. Para facilitar a visualização dos resultados, as faixas de frequências centrais das bandas S, C e X serão referenciadas por cores, sendo a banda S na cor azul, a banda C na cor verde e a banda X na cor vermelha.

#### 4.1.1. Geometria Inicial

A geometria inicial foi desenvolvida no software CATIA V5 apenas para fins de comparação e para expor o desenvolvimento do estudo. A Figura 15 ilustra essa geometria, que foi projetada tendo como referência a aeronave Northrop Grumman RQ-180. Na Figura 15 é possível observar o bordo de ataque e bordo de fuga da geometria.

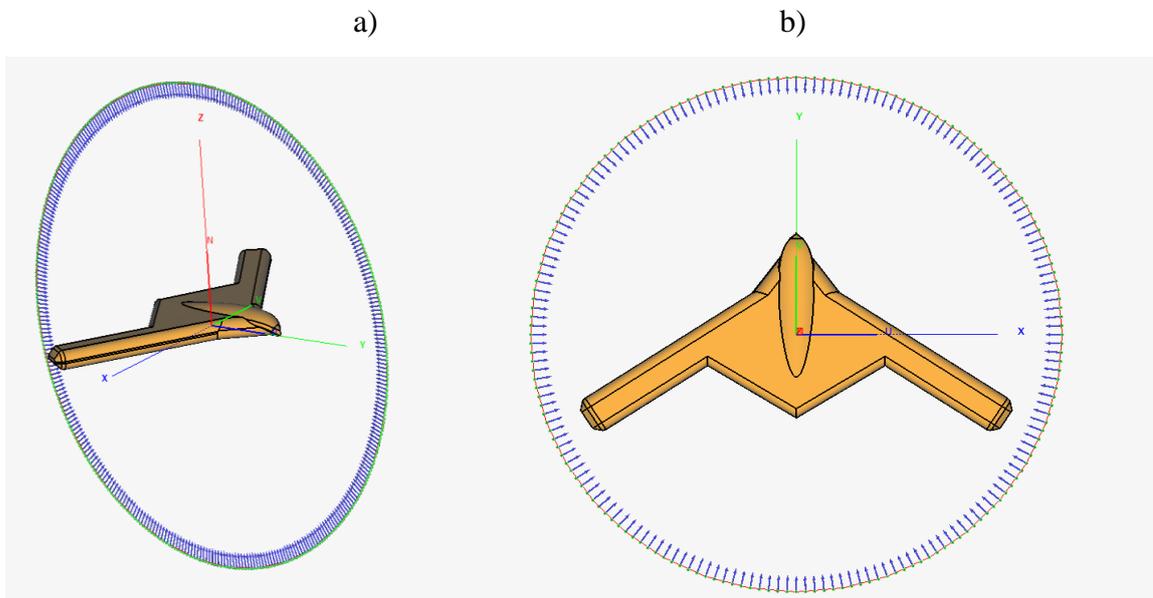
**Figura 15. Primeira geometria desenhada no CATIAV5 com malhas geradas no FEKO®.**



Fonte: Autoras (2024).

A geometria foi inserida no *software* FEKO® para simulação, conforme ilustrado na Figura 16. A figura apresenta as direções dos sinais incidentes do radar que foram analisadas, exibindo a geometria em perspectiva isométrica. As setas azuis indicam a direção dos sinais incidentes ao longo dos planos, sendo que a Figura a) se trata do plano “zy” e a Figura b) do plano “yx”.

**Figura 16. Direções dos sinais incidentes na primeira geometria. a) Plano zy, b) Plano yx**

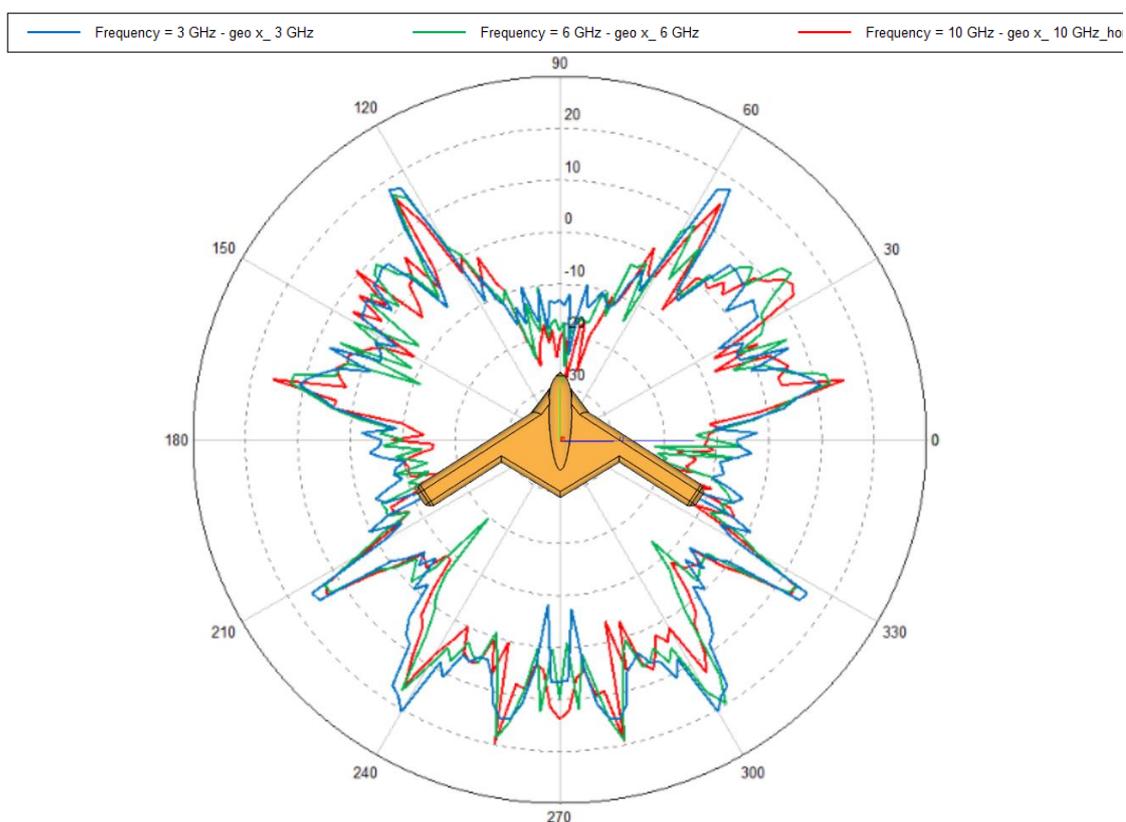


Fonte: Autoras (2024).

Os resultados apresentados na Figura 17 indicam que a geometria inicial utilizada como base de estudo, não atingiu o objetivo de reduzir significativamente o RCS em diversas

direções. O gráfico polar indica que o sinal refletido, representando a intensidade do eco do radar, é elevado em várias direções ao redor da aeronave. Esse comportamento evidencia que a geometria atual não possui um bom desempenho em termos de furtividade, uma vez que reflete grande parte da energia do radar em múltiplas direções. Para melhorar os resultados, seria necessário alterar o *design* da geometria, buscando redirecionar ou absorver o sinal incidente de forma mais eficiente.

**Figura 17. Resultados da primeira geometria no FEKO®.**



Fonte: Autoras (2024).

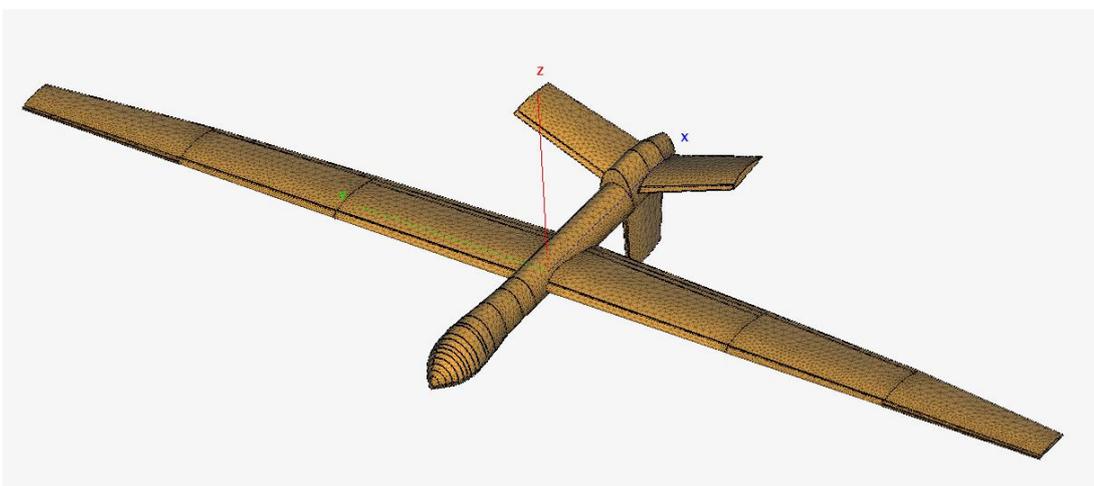
De acordo com os resultados apresentados na Figura 17, observa-se a presença de pontos de alta reflexão em relação à geometria inicial. Ao analisar o desenho no contexto desses resultados, é possível identificar algumas possíveis causas para esse comportamento. Primeiramente, o modelo desenvolvido no *software* CATIA V5 apresenta dimensões bastante robustas e transições contínuas entre a fuselagem e a asa da aeronave. Esse design contribui para que as ondas incidentes se espalhem em múltiplas direções, um efeito intensificado pela curvatura acentuada nos bordos de ataque e de fuga. Por outro lado, um aspecto positivo nessa geometria é a baixa reflexão apresentada nas pontas das

asas, especialmente nos ângulos alinhados a  $180^\circ$  e  $0^\circ$ , assim como a reduzida reflexão aparente na região do radome, correspondente ao ângulo de  $90^\circ$ . Esses fatores indicam áreas promissoras para futuras otimizações

#### 4.1.2. *Shadowhawk*

A seguinte geometria desenhada por meio de superfícies no *software* CATIAV5 foi feita com base no VANT *MQ-9A Reaper*, assim como mostra o item 3.1 *Benchmark*. A Figura 18 se trata do projeto 3D da aeronave inserido no *software* de simulação eletromagnética, sendo que a malha gerada já está inserida no modelo.

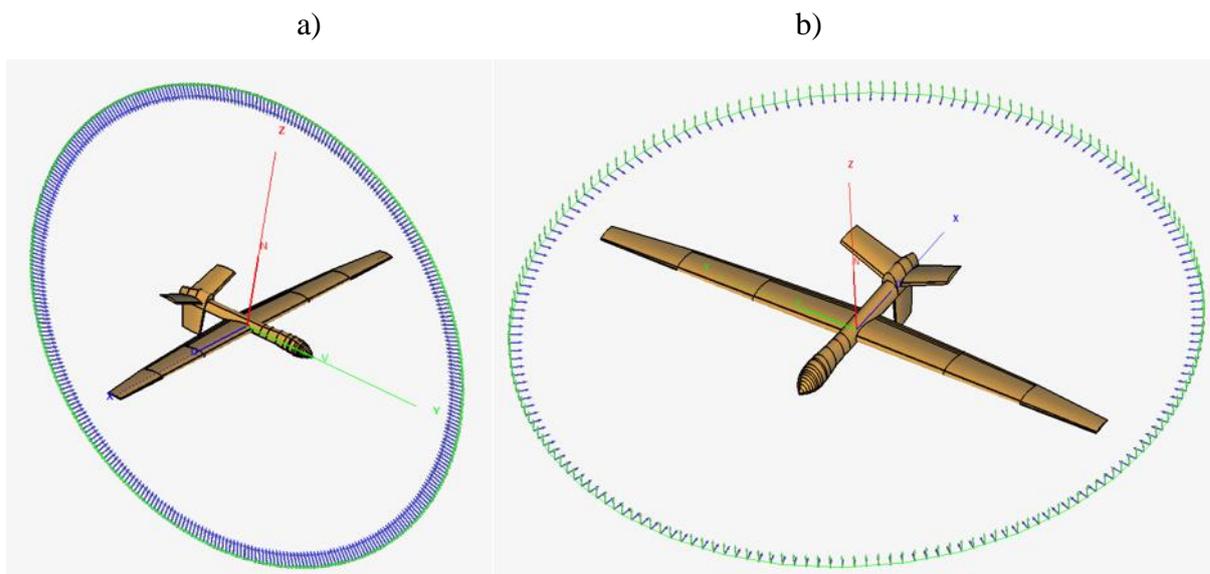
**Figura 18. Geometria *Shadowhawk* desenhada no CATIAV5 com malhas geradas no FEKO®.**



Fonte: Autoras (2024).

A Figura 19 contém o desenho Shadowhawk inserido no FEKO®, as direções em azul são indicações do sinal incidente nos planos horizontal e vertical (zy e xy).

**Figura 19. Direções dos sinais incidentes na geometria *Shadowhawk*. a) Plano zy, b) Plano xy**



Fonte: Autoras (2024).

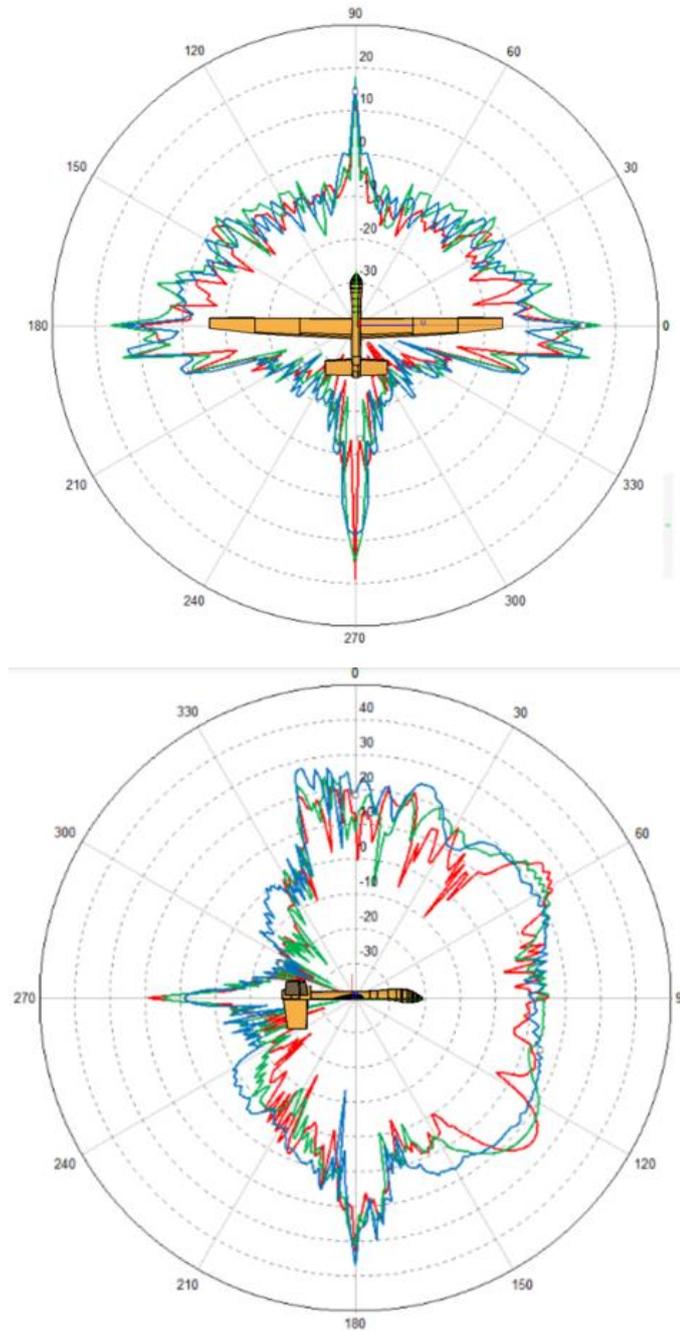
A geometria *Shadowhawk* foi simulada no *software* FEKO® nas faixas centrais às bandas S, C e X. Ao analisar os resultados da Figura 20.a observa-se uma alta reflexão das asas da aeronave em direção ao radar. Outro ponto de alta refletividade eletromagnética é a empenagem do *Shadowhawk*. Esse comportamento decorre de diversos fatores geométricos, especialmente de interação da área de contato da superfície da aeronave com os sinais incidentes, o que gera um efeito de espalhamento em múltiplas direções. No caso da geometria *Shadowhawk*, esse espalhamento ocorre de forma que grande parte da energia irradiada retorna ao receptor. Isso se deve, em grande parte, à presença de cantos arredondados superfícies curvas, que aumenta esse efeito.

Por outro lado, áreas de baixa reflexão também foram identificadas, contribuindo para uma melhor compreensão da assinatura dessa geometria. Entre essas áreas estão, o bordo de fuga e estabilizadores em V, que apresentam superfícies mais planas. Essas características indicam que formas geométricas mais planas têm um impacto significativo

na redução da reflexão de energia, o que é crucial para alcançar uma menor detecção por radares.

A Figura 20.b mostra resultados que corroboram as observações feitas na Figura 20.a. Nesta perspectiva, é possível notar que a aeronave, em relação ao radar, exhibe diversos pontos de alta reflexão, especialmente em áreas e superfícies arredondadas. Quando interagem com os sinais incidentes, essas regiões produzem um efeito de espalhamento elevado, como ocorre na fuselagem e no radome localizado no nariz da aeronave. A análise, revela que o efeito na fuselagem e na parte frontal da aeronave é quase simétrico, devido a continuidade geométrica dessas áreas. No entanto, em regiões com mais cantos vivos e superfícies planas, como na parte traseira, observa-se uma diminuição da refletividade da aeronave. Essa diminuição ressalta a importância de superfícies geométricas otimizadas para minimizar a assinatura radar.

Figura 20. Resultados da geometria *Shadowhawk* no FEKO®.

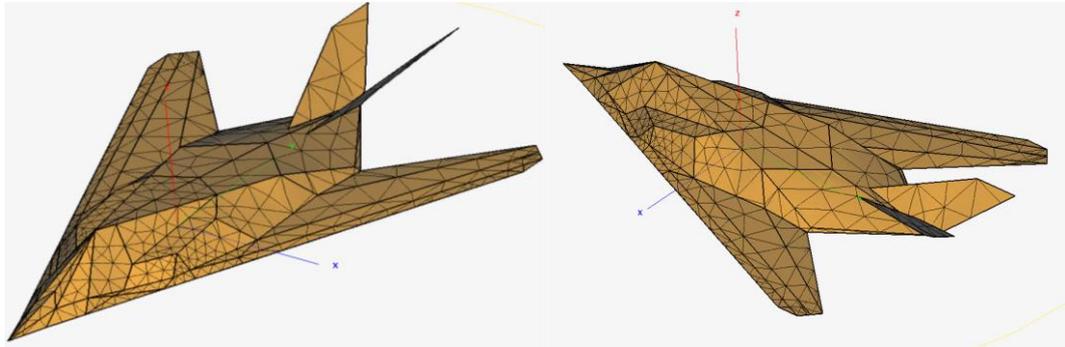


Fonte: Autoras (2024).

#### 4.1.3. *Thor*

A seguinte geometria desenhada por meio de superfícies no *software* CATIAV5 foi feita com base no F-117 Nighthawk, assim como mostra o Item 3.1 *Benchmark*. A Figura 21 se trata do projeto 3D da aeronave inserido no *software* de simulação eletromagnética, sendo que a malha gerada já está inserida no modelo.

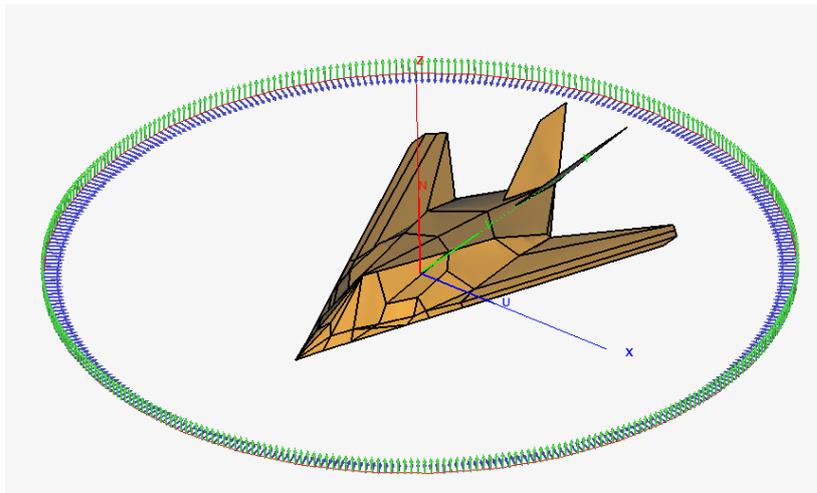
**Figura 21. Geometria *Thor* desenhada no CATIAV5 com malhas geradas no FEKO®.**



Fonte: Autoras (2024).

A Figura 22 contém o desenho *Thor* inserido no FEKO®, as direções em azul são indicações do sinal incidente nos planos horizontal e vertical.

**Figura 22. Direções dos sinais incidentes na geometria *Thor*.**



Fonte: Autoras (2024).

Com base na análise da geometria *Thor* representada na Figura 23, observa-se que a aeronave apresenta características de baixa refletividade eletromagnética em determinadas regiões, devido ao *design* focado na redução da assinatura radar. O modelo foi simulado utilizando o *software* FEKO® com malhas geradas no CATIA V5, considerando faixas centrais das bandas S, C e X.

A geometria *Thor* apresenta superfícies predominantemente angulares e planas, o que favorece o desvio da maior parte da energia eletromagnética incidente para direções

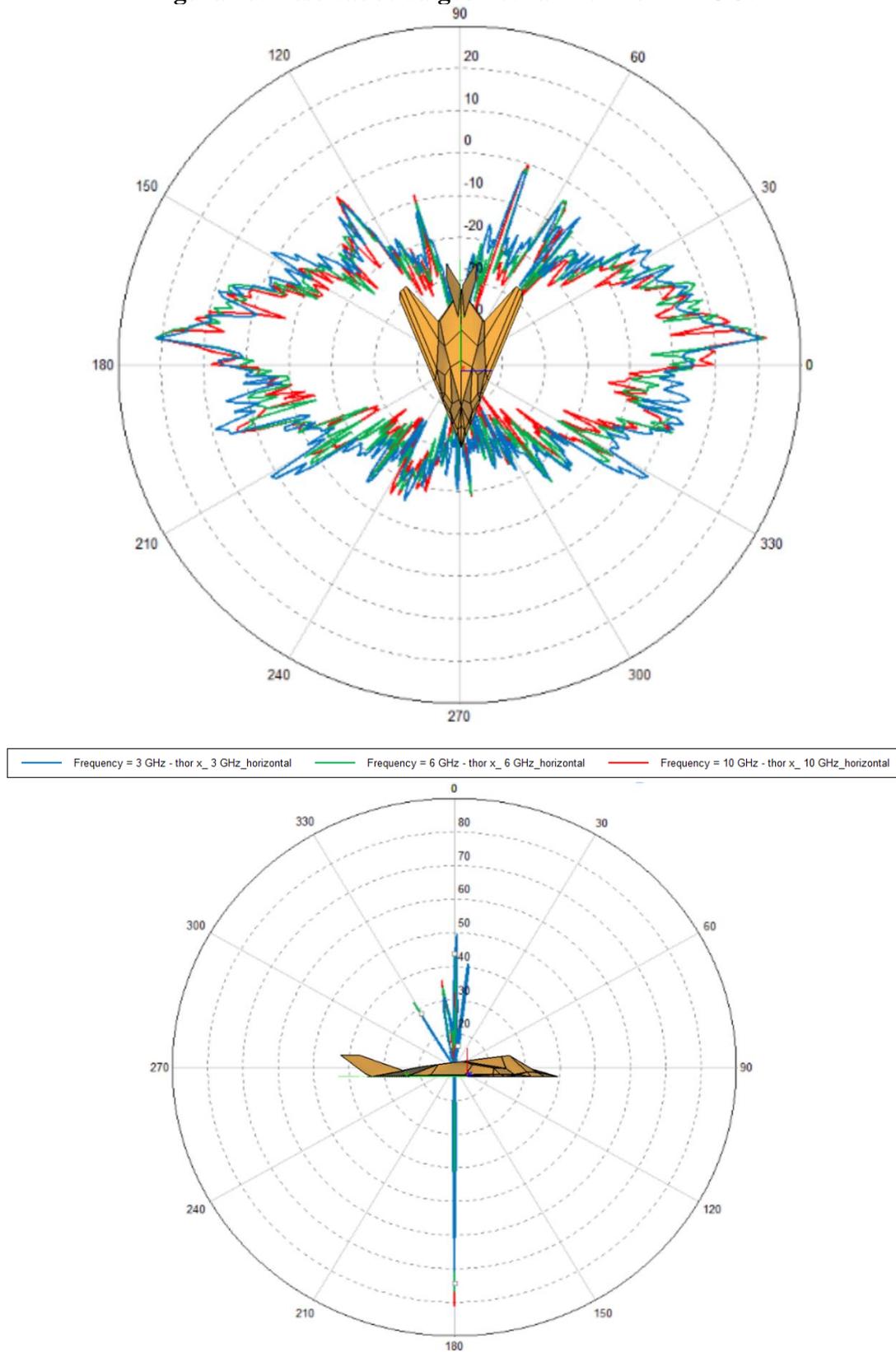
diferentes da do receptor do radar, minimizando o espalhamento retrógrado. Esse comportamento é essencial para a reduzir a detectabilidade radar, uma característica desejada em projetos stealth.

As análises indicam que áreas específicas da geometria, como as superfícies inclinadas das asas e o *design* do nariz, desempenham um papel crucial no direcionamento dos sinais incidentes. Além disso, a continuidade geométrica na parte superior do corpo da aeronave, associada a uma fuselagem lisa e com cantos vivos minimizados, reforça a característica de baixa reflexão. Contudo, pequenas áreas com bordas afiadas e junções podem gerar pontos de dispersão secundários. Apesar disso, esses pontos de dispersão são significativamente menores em comparação aos encontrados em aeronaves com designs convencionais.

Na parte traseira, as superfícies mais planas e anguladas foram projetadas para reduzir ainda mais a assinatura radar. Ao contrário de fuselagens arredondadas, a Thor distribui o espalhamento de forma mais eficiente, evitando concentrações de energia refletida na direção do radar emissor.

Apesar do bom desempenho nas regiões facetadas, a aeronave *Thor* apresenta uma limitação significativa no bordo de ataque da asa, onde ocorre uma alta reflexão. Essa área, por possuir maior continuidade e maior tamanho, tende a refletir ondas eletromagnéticas de forma indesejada. Uma possível solução seria reduzir a dimensão do bordo de ataque, considerando que, por se tratar de uma asa voadora, a área da asa corresponde praticamente a todo comprimento e envergadura toda da aeronave. Outra abordagem seria a aplicação de MARE no bordo de ataque, permitindo a análise do comportamento da geometria após a aplicação desse material.

Figura 23. Resultados da geometria *Thor* no FEKO®.

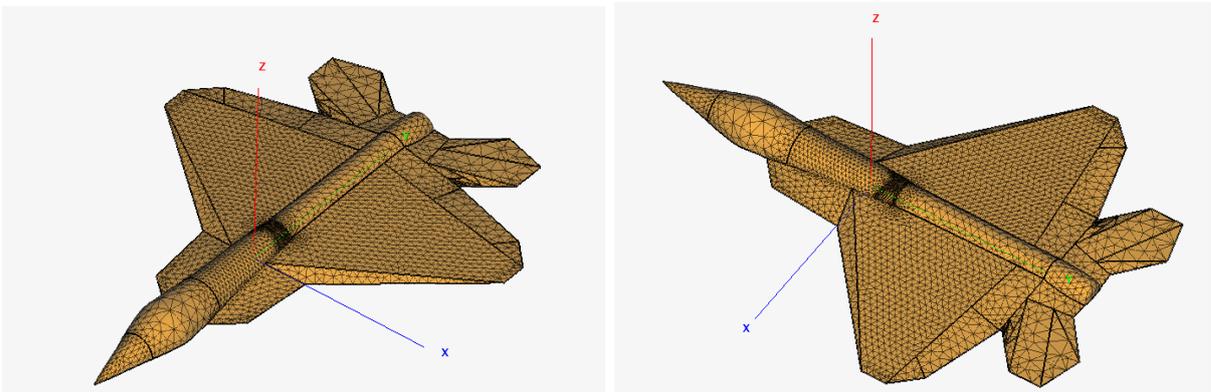


Fonte: Autoras (2024).

#### 4.1.4. *Hidden Viper*

A seguinte geometria desenhada por meio de superfícies no *software* CATIAV5 foi feita com base no Sukhoi Su-57, assim como mostra o Item 3.1 *Benchmark*. A Figura 24 se trata da geometria 3D da aeronave inserido no *software* de simulação eletromagnética, sendo que a malha gerada já está inserida no modelo.

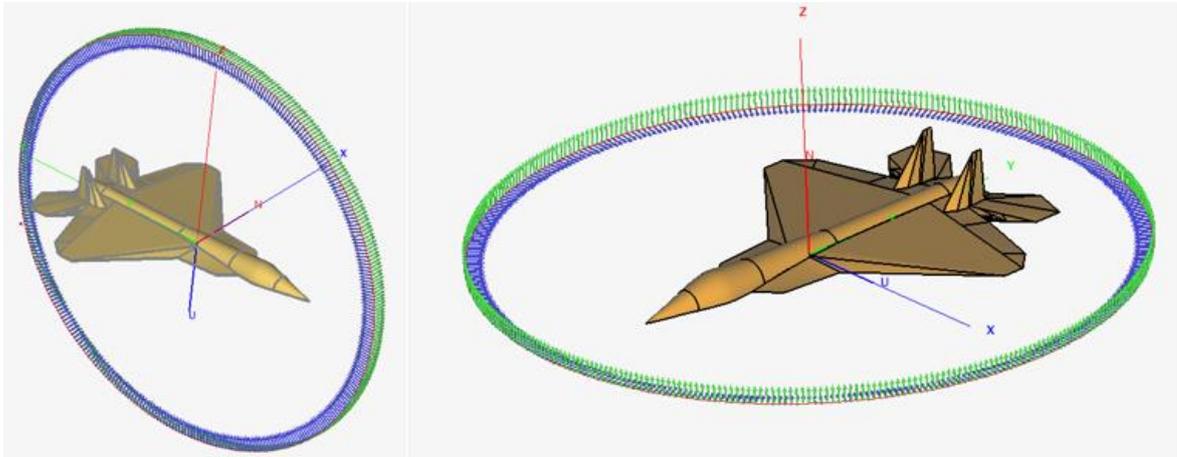
**Figura 24. Geometria *Hidden Viper* desenhada no CATIAV5 com malhas geradas no FEKO®.**



Fonte: Autoras (2024).

A Figura 25 contém o desenho *Hidden Viper* inserido no FEKO®, as direções em azul são indicações do sinal incidente nos planos horizontal e vertical.

**Figura 25. Direções dos sinais incidentes na geometria *Hidden Viper*.**



Fonte: Autoras (2024).

Com base nos resultados da aeronave *Hidden Viper*, apresentados na Figura 26, observa-se um comportamento eletromagnético interessante, resultado de um projeto que combina características *stealth* com capacidades aerodinâmicas avançadas de um caça, como mencionado anteriormente. A geometria da aeronave apresenta elementos estratégicos que contribuem tanto para a redução de sua assinatura radar quanto para sua eficiência operacional em combate.

A análise revela a integração suave entre as asas e o corpo principal forma uma continuidade geométrica que tende a direcionar os sinais de radar para longe do receptor. A presença de cantos vivos em pontos estratégicos, especialmente nas junções entre a fuselagem e as superfícies de controle, reduz a reflexão do radar nesses locais.

Outro ponto de destaque é o nariz da aeronave, que abriga o radome e possui uma forma levemente pontiaguda. Essa geometria contribui para minimizar os retornos de radar frontais, uma característica fundamental em enfrentamentos diretos. No entanto, a parte arredondada dessa região oferece potencial de melhorias.

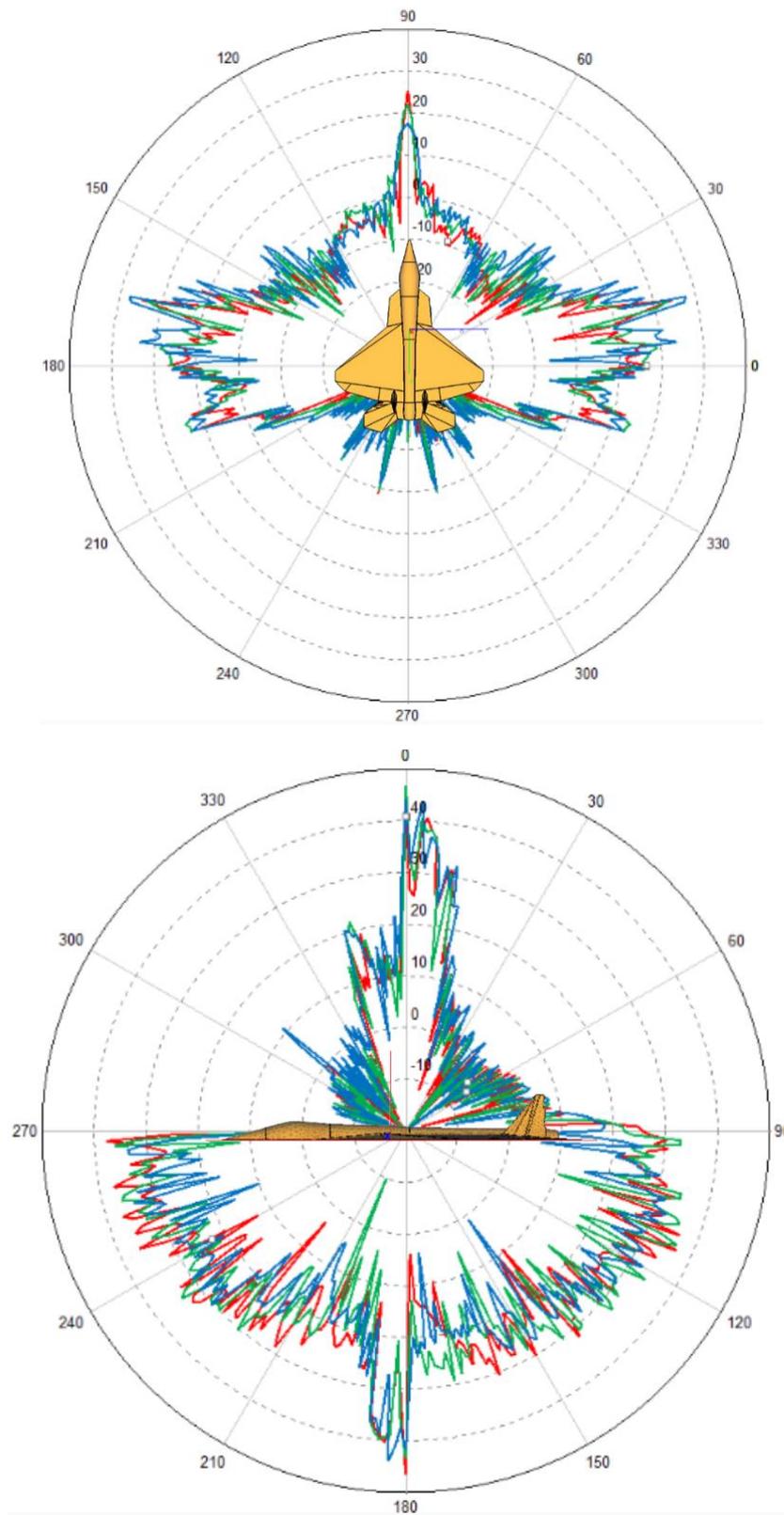
Na parte traseira, os estabilizadores verticais inclinados contribuem para a redução da RCS. A orientação angular dos estabilizadores promove o espalhamento dos sinais em múltiplas direções, contribuindo para a furtividade.

Apesar de apresentar diversos pontos *stealth*, a aeronave ainda apresenta regiões maior reflexão, principalmente nas superfícies arredondadas da parte frontal e nas laterais da fuselagem. Embora essas áreas sejam inevitáveis devido às exigências aerodinâmicas, sua

influência pode ser mitigada com o uso de materiais absorventes de radar e pelo posicionamento estratégico das superfícies refletivas.

Em resumo, a geometria inspirada no Sukhoi Su-57 demonstra uma integração entre características furtivas e aerodinâmicas, onde o uso de superfícies inclinadas, ângulos estratégicos e materiais especializados resulta em uma assinatura radar reduzida, mantendo, ao mesmo tempo, uma elevada capacidade de manobra e desempenho em combate. Embora não seja ideal para missões que demandem invisibilidade total ao radar, a aeronave apresenta-se como uma solução viável para operações como ataques de precisão e missões estratégicas.

Figura 26. Resultados da geometria *Hidden Viper* no FEKO®.

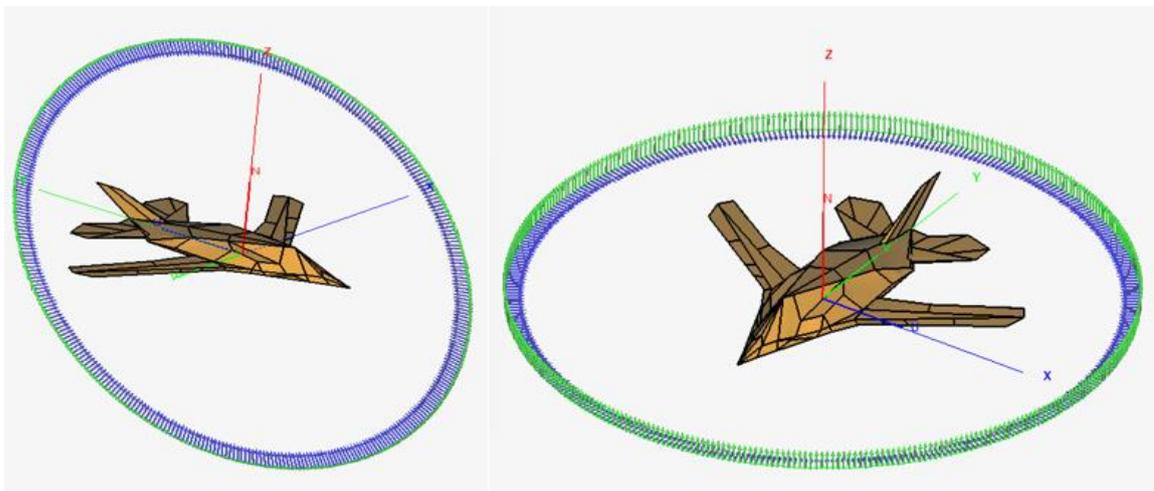


Fonte: Autoras (2024).

#### 4.2. Geometria Final *Nautilus*

Após estudar e analisar as geometrias desenhadas, foi criada uma geometria final, com os conceitos aprendidos, visando adquirir menor refletividade possível aos radares, a última geometria (*Nautilus*) foi desenhada CATIAV5 por meio de superfícies, suas características foram escolhidas com base nos resultados das aeronaves anteriores. A geometria pode ser vista na Figura 27, com as direções dos sinais incidentes da radiação eletromagnética indicadas pelas setas azuis.

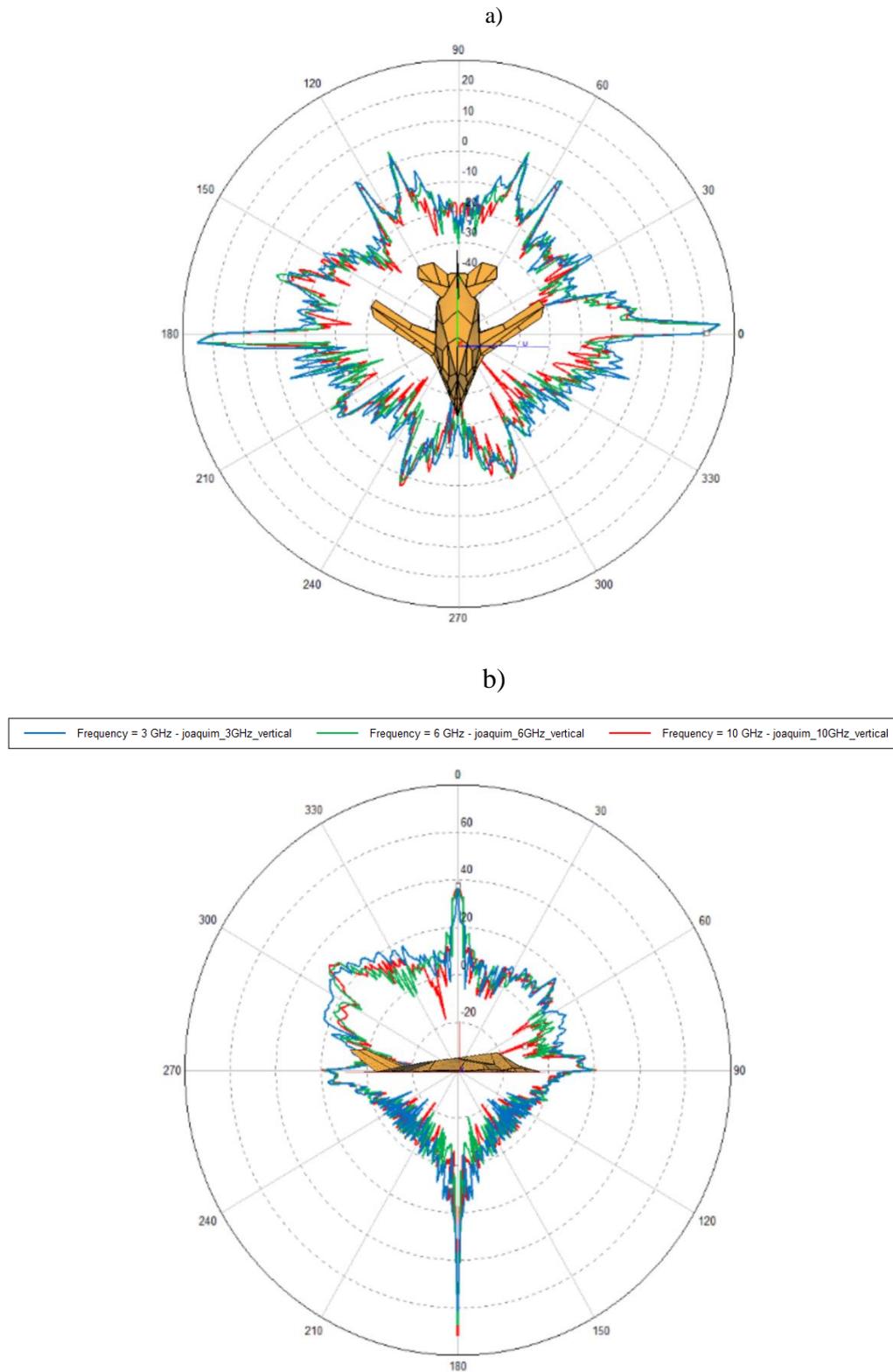
**Figura 27. Direções dos sinais incidentes na geometria *Nautilus*.**



Fonte: Autoras (2024).

A geometria *Nautilus* tem como característica principal superfícies facetadas, devido a esta característica apresentar melhores resultados nos estudos feitos com base nas geometrias das aeronaves anteriores, a aeronave real com esta geometria não poderia conter cantos vivos, de forma que as superfícies facetadas em conjunto com cantos arredondados do revestimento irão influenciar na diminuição da reflexão. A Figura 28.a e 28.b apresentam os resultados obtidos pela simulação de RCS no *software*.

Figura 28. a) Resultados da geometria *Nautilus* plano xy. b) Resultados da geometria *Nautilus* plano zy.



Fonte: Autoras (2024).

A análise do resultado da geometria final deve ser feita cuidadosamente, uma vez que os parâmetros de comparação utilizados não apresentam padrões claros. As superfícies facetadas contribuíram para a reflexão das ondas incidentes de forma que se diminuiu a difusão dos sinais, a geometria escolhida para superfícies de comando e fuselagem foram selecionadas após análises das geometrias anteriores, o que se mostrou eficaz no propósito. Os pontos de maior reflexão encontrados foram principalmente o bordo de fuga da asa, a parte superior da fuselagem alinhada a  $0^\circ$  na Figura 29.b, o ponto inferior da fuselagem localizado a  $180^\circ$  na Figura 29.b teve uma alta difusão do sinal devido a uma distorção na simulação, causada pela alta planicidade do desenho 3D nesta parte, um detalhe a ser melhorado em futuros estudos.

As superfícies facetadas ajudaram a diminuir o sinal espalhado, isso acontece devido a ao ângulo da superfície desviar o sinal em relação a direção do radar receptor, evitando um ângulo de  $90^\circ$  da superfície refletora e do receptor, é possível melhorar o projeto, desta forma as superfícies de comando podem ser inclinadas.

Em relação aos pontos de maior reflexão, como as asas, a melhor solução utilizada em diversas aeronaves *stealth* é a aplicação de MARE, sendo assim, para a geometria Nautilus o MARE seria distribuído nas superfícies de comando, mais especificamente no bordo de ataque da asa e no estabilizador vertical, localização da maior quantidade de sinal refletido.

### 4.3 Comparações Finais

A tabela 7 mostra os picos de reflexão em dB para diferentes geometrias (*Shadowhawk*, *Thor*, *Hidden Viper* e *Nautilus*), distribuídos em regiões críticas da aeronave como asa, empenagem, fuselagem, e bordos de ataque e fuga da asa.

**Tabela 7. Bandas de radar e seus alcances**

Picos de Reflexão em dB				
Região da Aeronave	Geometrias			
	<i>Shadowhawk</i>	<i>Thor</i>	<i>Hidden Viper</i>	<i>Nautilus</i>
Asa	18	21	20	21
Empenagem	30	0	-10	0
Fuselagem	20	-20	22	-15
Bordo de ataque da asa	-10	-20	-10	-10
Bordo de fuga da asa	0	-10	-8	-20

Fonte: Autoras (2024).

A *Nautilus* demonstra um desempenho equilibrado, com valores próximos às demais geometrias em regiões principais (asa e fuselagem), mas superior em áreas secundárias, como bordos de ataque e fuga. Seu bordo de fuga, por exemplo, atinge -20 dB, um valor significativamente mais baixo que o *Shadowhawk* e *Hidden Viper*, mostrando que o cuidado no design dessas áreas pode ter um impacto expressivo na redução do RCS.

Por outro lado, a *Shadowhawk* apresenta uma alta reflexão na empenagem (30 dB), o que demonstra que esta região ainda possui limitações no design stealth. Isso indica que ângulos de superfície ou ajustes geométricos podem ser menos refinados nesta configuração. Além disso, é possível observar, relação às faixas de frequência analisadas, que a frequência da banda X de 10 GHz apresentou melhores resultados na maioria dos casos, sendo refletida menor quantidade de sinal.

O desempenho geral das geometrias *Hidden Viper* e *Thor* é consistente, mas a *Nautilus* supera ambas em pontos mais sutis, evidenciando o refinamento no projeto das áreas secundárias.

Esses resultados destacam a importância de projetar cada seção da aeronave considerando a distribuição de reflexão, mostrando que detalhes nas áreas de bordos de ataque e fuga podem ser decisivos.

No contexto do estudo, focado em projetos, é crucial reforçar a importância da capacidade de projetar com atenção aos detalhes. Para isso, foi necessário identificar superfícies críticas (como as asas) e aplicar estratégias para suavizar a reflexão radar, como ângulos agudos e a redução de superfícies planas, representando um diferencial importante.

Além disso, destaca-se que regiões como as asas são críticas e apresentam alta reflexão natural devido à sua função aerodinâmica. Embora ajustes em ângulos possam minimizar o impacto, a funcionalidade dessas superfícies não pode ser comprometida. A

integração de materiais absorventes de radar é essencial para melhorar o desempenho furtivo sem sacrificar a aerodinâmica.

Por fim, a *Nautilus* apresentou o melhor desempenho geral em termos de RCS, especialmente em regiões secundárias, como os bordos da asa, demonstrando maior refinamento no projeto.

#### 4.4 Estudos Futuros

Embora o foco do presente estudo tenha sido a análise de RCS com base em geometria, é necessário considerar outros fatores importantes, como:

- **Aerodinâmica:** O alinhamento de uma baixa assinatura radar com boa eficiência aerodinâmica é essencial para garantir que a aeronave seja funcional e eficiente em sua missão.
- **Peso:** Geometrias complexas podem aumentar a massa estrutural, impactando o desempenho
- **Custo e Materiais:** Materiais com características furtivas (absorvedores de radar) são fundamentais, mas têm um custo elevado. Essa escolha é uma extensão natural do projeto.

Portanto, um desdobramento futuro poderia englobar a integração de materiais furtivos nas geometrias otimizadas, permitindo uma análise mais abrangente de desempenho. Explorando assim o impacto de materiais RAM em combinação com a geometria para reduzir ainda mais o RCS.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho foi estruturado de forma a proporcionar um entendimento mais profundo sobre o comportamento do RCS (Radar Cross Section) em aeronaves e atender aos objetivos definidos com precisão. A pesquisa abordou desde a caracterização eletromagnética de materiais até o impacto da geometria no RCS, com foco em fornecer uma base sólida para projetos stealth em aeronáutica. Inicialmente, foi realizada a caracterização eletromagnética do compósito de fibra de carbono com resina epóxi, que apresentou uma refletância de 90%, confirmando sua compatibilidade com os cenários simulados. Para simplificar os cálculos e validar a abordagem, o compósito foi modelado como um material condutor elétrico perfeito (PEC) no software FEKO®. Essa decisão permitiu concentrar esforços na análise geométrica, sem comprometer a representatividade dos resultados. Quatro geometrias distintas de aeronaves – Shadowhawk, Thor, Hidden Viper e Nautilus – foram projetadas em CAD e simuladas no FEKO® para frequências das bandas S, C e X. Os resultados mostraram que ângulos agudos, superfícies facetadas e transições suaves entre as diferentes partes da aeronave contribuem significativamente para a redução do RCS, reforçando a importância de evitar ângulos de 90° em relação ao radar receptor. Em contrapartida, superfícies muito planas e bordos mal projetados tendem a aumentar o RCS, destacando a relevância do detalhamento no design. Os dados de simulação, como apresentados na tabela de reflexão em dB, demonstraram diferenças importantes entre as geometrias analisadas. A geometria *Nautilus* apresentou os melhores resultados gerais, destacando-se por obter baixos valores de reflexão em regiões secundárias, como o bordo de ataque (-10 dB) e o bordo de fuga (-20 dB) da asa, enquanto manteve desempenho semelhante às demais nas regiões principais, como fuselagem e asa. Em contrapartida, a *Shadowhawk* teve maiores picos de reflexão em áreas críticas, como a empenagem (30 dB) e a fuselagem (20 dB), o que comprometeu sua furtividade em relação às outras geometrias. A análise por frequência revelou que a banda X (10 GHz) apresentou os menores valores de RCS na maioria das simulações, indicando que os ângulos geométricos e o comportamento eletromagnético das superfícies tendem a ser mais eficazes nessa faixa. Esses resultados destacam a importância de alinhar as características geométricas com a frequência do radar predominante para maximizar a furtividade. Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se ampliar as análises para incluir a interação entre materiais absorvedores de radar (RAM) e a geometria, de forma a otimizar a assinatura radar de maneira integrada. Outra linha de estudo seria comparar o impacto da geometria no RCS em relação a outros critérios

de projeto, como eficiência aerodinâmica, peso estrutural e custo, permitindo uma abordagem multidisciplinar mais completa. Adicionalmente, seria relevante investigar o comportamento de materiais dielétricos e metálicos em geometrias mais complexas, com foco em avaliar a diferença no espalhamento de radar em cenários reais. Por fim, o trabalho destaca a importância do papel do projetista em projetar geometrias otimizadas que considerem não apenas a redução do RCS, mas também os requisitos globais da aeronave, consolidando o conhecimento adquirido e abrindo caminhos para projetos mais sofisticados e eficientes no futuro.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROENGENHARIA. O que é: **Normalized Radar Cross Section in Remote Sensing**, 2024. Disponível em: <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-normalized-radar-cross-section-in-remote-sensing/#:~:text=A%20NRCS%20%C3%A9%20baseada%20nos,composi%C3%A7%C3%A3o%20e%20rugosidade%20da%20superf%C3%ADcie>. Acesso em: 10/2024.

AEROENGENHARIA. **O que é: VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados)**, 2023. Disponível em: <https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-vants-veiculos-aereos-nao-tripulados/>. Acesso em: 10/2024.

ANAC. **RPAS – TEMAS DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS, 2015.** Disponível em: <https://www2.anac.gov.br/rpas/#:~:text=O%20termo%20Sistema%20de%20Aeronave,para%20lan%C3%A7amento%20e%20recupera%C3%A7%C3%A3o%2C%20etc>. Acesso em: 05/2024.

ANDERSON JR. A. G. **Estudo sobre o modelamento de um aerofólio NACA 0012**, 2012. Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/~phoenics/EM974/PROJETOS/PROJETOS%201%20SEM-12/TURMA%20B/G3-ok/NACA0012.pdf>. Acesso em: 10/2024.

ANTUNES, M. H. D. O. **Estudo sobre a influência da porosidade no potencial de atenuação eletromagnética de compósitos magnéticos a base de ferrocarbonila e silicone, na faixa de frequência referente à banda X (8,2-12,4 GHz) e Ku (12,4-18 GHz).** 2024. 52 f. Artigo de Iniciação Científica. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Laboratório Associado de Sensores e Materiais, São José dos Campos.

AVIATION WEEK. **USAF Unit Moves Reveal Clues To RQ-180 Ops Debut**, 2019. Disponível em: <https://aviationweek.com/defense-space/usaf-unit-moves-reveal-clues-rq-180-ops-debut>. Acesso em: 09/2024.

BEÑO, V.; J.R, F. A.; UNMANNED COMBAT AIR VEHICLE: MQ-9 REAPER. In: International Conference of Scientific Paper Afases. 2024, Brasov. **Anais...** Brasov, 2014. 6 f.

BRITANNICA. **F-117 aircraft.** Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/Boeing-777>. Acesso em: 09/2024.

CAMARGO, E. B.; WEBLER, G.; CASSOL, F. **Simulação numérica de escoamento sobre perfil aerodinâmico eppler 423.** Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, v. 5, n. 2, 2018.

COELHO, L. V.; ANDRADE, L. A. e REZENDE, M. C.; Estudo para a redução da RCS frontal de aeronaves de caça. In: XI Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, 2009, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos.

CUNHA, A. M. S.; PAULA, A. F. D.; BRAGHIROLI, F. L.; AMARAL-LABAT, G. A.; CEMBRANELLI, G. A.; YAMAMOTO, F. M.; LOPES, B. H. K. e BALDAN, M. R. Estudo do potencial de atenuação de Biochar em compósitos híbridos na Banda K (18-26,5 GHz) para uso em 5G - Parte I. In: 10º CONGRESSO BRASILEIRO DE CARBONO, 2023, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos.

DA SILVA, R. E.; GOMES, N. A.; ALVES, M. A.; FOLGUERAS, L. D. C. e CERQUEIRA, M. C. Estudo para Simulação da Seção Reta Radar de Aeronave Cougar (HM-3/AS 532 UE). In: XXV SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 2016, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2023. 5 f.

DE MORAES Y. F.; LOPES, B. H.; RICHTER, R. M; FABBRO, T. M.; CEMBRANELLI, G. S.; BALDAN, M. R.; DOS SANTOS, L. P. S. e MINEIRO, S. L. Aplicação de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética na redução da Seção Reta Radar. In: 14º

WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 2023, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2023. 10 f.

DE AZARA, P. M.; DOS SANTOS POUZADA, E. V. e DE TOLOSA, T. A. G. **Caracterização de Materiais – Sensores de Permissividade Elétrica em Frequências de Micro-Ondas. 2019.** 8f. Artigo de iniciação científica, Escola de Engenharia de Mauá - EEM/CEUN-IMT. Mauá. 2019.

DE CASTRO FARIA, S. F. **Teoria de Voo de Alta Velocidade.** Palhoça: UnisulVirtual, 2019.

DE CASTRO, J. D. C.; DA SILVA, F. S.; REZENDE, M. C.; MARTIN, I. M. **Absorvedores de Radiação Eletromagnética Aplicados no Setor Aeronáutico.** Revista de Ciências e Tecnologia, v. 8, n. 15, p. 33-42, 2000.

DICIO. **Significado de Aerofólio.** Disponível em: <https://www.dicio.com.br/aerofolio/>. Acesso em: 08/2024.

ENGENHARIA AERONÁUTICA. **VANT, ARP, SARP, UAV, UAS, RPAS... Qual a diferença?**, 2022. Disponível em: <https://engenhariaaeronautica.com.br/curiosidades-engenharia-aeronautica/vant-arp-sarp-uav-uas-rpas/>. Acesso em: 05/2024.

ETZIONI, A. **O Grande Debate sobre os VANT. Military Review, Estados Unidos**, n. 3, p. 79-92. 2013.

FIORIO, P. R.; **Utilização de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA – Drones) para a Agricultura.** Acesso em: 2024. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6381465/mod\\_resource/content/0/AULA\\_FOTOGRAMETRIA\\_RPA.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6381465/mod_resource/content/0/AULA_FOTOGRAMETRIA_RPA.pdf)

GENERAL ATOMICS. **New Generator Coming Online for Gray Eagle ER UAS.**

Disponível em: <https://www.ga.com/new-generator-coming-online-for-gray-eagle-er-uas>. Acesso em: 08/2024.

GOMES, N. A.; Richter, R. M.; LOPES, B. H. e BALDAN, M. R. Capacidade de Detecção da Aeronave UAV X-47B em Função da Predição da RCS Estática. In: XXV SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 2023, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2023. 5 f.

GOMES, N.A.S.; PEREIRA, T.S.M. e PEIXOTO, A.M. A Influência da RCS Dinâmica na Probabilidade de Detecção de uma Aeronave de Combate. **Spectrum – Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**. Vol. 1, p. 9-15, 2022.

HONEYWELL. **General Atomics MQ-9 Reaper**. Disponível em: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/industry/defense/defense/mq-9-reaper>. Acesso em: 08/2024.

IAI. **Heron TP – MALE Drone**. Disponível em: <https://www.iai.co.il/p/heron-tp>. Acesso em: 08/2024.

INFOENEM. **Entenda a Importância da Resistência do Ar**, 2019. Disponível em: <https://infoenem.com.br/entenda-a-importancia-da-resistencia-do-ar/>. Acesso em: 09/2024.

ITARC. **Mapas aéreos com drones: quais são os mercados de maior destaque?**, Disponível em: <https://itarc.org/mapas-aereos-com-drones/>. Acesso em: 05/2024.

LOPES, B. H. K. **Estudo da capacidade de absorção de onda eletromagnética por particulados de ferrita MNZN e ferro carbonila dispersos em matriz de borracha de silicone na faixa de frequência referente à banda X (8,2-12,4 ghz)**. 2020. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

LOPES, B. H.; GOMES, N. A.; LIMA, R. G. e BALDAN, M. R. Efeitos de superfícies seletoras de frequências no potencial de atenuação eletromagnético ao longo da Banda X, utilizando o FEKO. In: 13° WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 2022, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2022. 10 f.

LUNA, S. M.; DIAS, R. D. M.; ALMEIDA, N. N. D.; Avanços da ciência e da tecnologia sobre a guerra, sua modernização e novas estratégias: aspectos importantes para defesa da Amazônia Azul. p. 654-666. In: **Anais** do XVIII Simpósio de Pesquisa Operacional & Logística da Marinha. São Paulo: Blucher, 2016.

MASSAMBANI, O.; **Fundamentos do Radar**. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas- IAG-USP. Acesso em: 11/2024. Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/material/omassamb/radar/Fundamentos%20do%20Radar%20-%20Capitulo%202%20-%20Prof.pdf>

MEDIUM. **Analyze Dipole Antenna with FEKO**. 10/2020. Disponível em: <https://musaddiq-al-ali.medium.com/quick-guide-of-feko-series-lesson-1-simple-dipole-antenna-b49a8692203c>.

MELO, W. F. D. O.; BARBOSA, G. D. M.; LIMA, R. D. C.; Uso da furtividade nos meios de superfície. Revista Pesquisa Naval, Vol. 1, n. 34, p. 67-72, 2022.

MENEZES, P. C. F. D. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos absorvedores de radiação eletromagnética**. 2015. 107 f. Tese (Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais) - UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2015.

NAVAIR. **Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook**. Point Mugu, California: Naval Air Warfare Center Weapons Division, 2013.

NOGUEIRA, W. **Entenda as Faixas de Frequência e suas Aplicações**, 2022. Disponível em: <https://www.whcengenharia.com.br/post/entenda-as-faixas-de-frequ%C3%Aancia-e-suas-aplica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 04/2024.

NORTHROP. **Global Hawk: Vigilance for a Changing World**. Disponível em: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/global-hawk>. Acesso em: 08/2024.

REVISTA FORÇA AÉREA. **Northrop Grumman RQ-180? Uma foto, mil teses!** Disponível em: <https://forcaaerea.com.br/northrop-grumman-rq-180-uma-foto-mil-teses/>. 2020.

RFI. **Rusia intensifica los combates en torno a Járkov frente a ucranianos debilitados**, 2024. Disponível em: <https://www.rfi.fr/es/europa/20240514-rusia-intensifica-los-combates-en-torno-a-j%C3%A1rkov-frente-a-ucranianos-debilitados>. Acesso em: 21/05/2024.

SEQUEIRA, V. **Band of frequencies used for radar and satellite systems**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Band-of-frequencies-used-for-radar-and-satellite-systems\\_tbl1\\_329155691](https://www.researchgate.net/figure/Band-of-frequencies-used-for-radar-and-satellite-systems_tbl1_329155691). 2018. Acesso em: 08/2024.

SWEETMAN, B. **Stealth Aircraft: Secrets of Future Airpower**. Nevada: Motorbooks Intl, 1986.

TECHNODEFESA. **Gripen - Eletronicamente, stealth**, 2021. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/gripen-eletronicamente-stealth>. Acesso em: 09/2024.

TREVISAN, D. A.; BELLINI, L. B.; ARAUJO, L. F. C.; SILVA, L. B. D.; MATTOS, L. G.; OLIVEIRA, M. S. D.; SANTOS, M. R. G. D.; AMORIM, N. P. D. **Materiais Compósitos na Indústria Aeronáutica**. 2023. 41 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Aviação Civil) - Universidade Anhembi Morumbi, Campus Vila Olímpia, São Paulo, 2023.