ESTUDO DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO BIM NO PROJETO DE AERONAVES PARA COMPETIÇÃO DE AERODESIGN - SAE BRASIL

MATHEUS JANOSKI KARAS

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO BIM NO PROJETO DE AERONAVES PARA COMPETIÇÃO DE AERODESIGN - SAE BRASIL

MATHEUS JANOSKI KARAS

Orientador: PROF. DR. ALBERTO CARLOS GUIMARÃES CASTRO DINIZ, ENM/UNB

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PUBLICAÇÃO ENM - UNB -
BRASÍLIA-DF, 06 DE MAIO DE 2022 .

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO BIM NO PROJETO DE AERONAVES PARA COMPETIÇÃO DE AERODESIGN - SAE BRASIL

MATHEUS JANOSKI KARAS

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz, ENM/UnB
Orientador

Prof. Dr. Mateus Rodrigues Miranda, FGA/UnB
Co-orientador

Prof. Dr. João Manoel D. Pimenta, ENM/UnB
Examinador interno

Profª. Dra. Marcela Rodrigues Machado, ENM/UnB
Examinador interno

BRASÍLIA, 06 DE MAIO DE 2022 .

FICHA CATALOGRÁFICA
MATHEUS JANOSKI KARAS
ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO BIM NO PROJETO DE AERONAVES
2022 xv, 67p., 201x297 mm
(ENM/FT/UnB, Engenheiro Mecânico, Engenharia Mecânica, 2022)
Projeto de Graduação - Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MATHEUS JANOSKI KARAS (2022) ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO BIM NO PROJETO DE AERONAVES. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Publicação , Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: MATHEUS JANOSKI KARAS
TÍTULO: ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DO BIM NO PROJETO DE AERONAVES.
GRAU: Engenheiro Mecânico ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

MATHEUS JANOSKI KARAS
matheus.karas@gmail.com

Agradecimentos

Agradeço a minha família o apoio neste período longe de casa; aos professores orientadores, obrigado pela confiança.

Resumo

O BIM (*Building Information Modelling*) é uma metodologia de desenvolvimento e gerenciamento de projetos pautada na utilização de ferramentas computacionais, com o objetivo de garantir a comunicação integral entre os profissionais em todo o ciclo de vida do produto. Nesse Projeto de Graduação estudou-se a viabilidade da conexão entre o BIM e o Aerodesign através da equipe Draco Volans, da Universidade de Brasília, ao descrever o fluxo de projeto seguido pela equipe e ao comparar essa metodologia com outra já largamente usada na Indústria, o PLM. Foi apresentado os pontos de deficiência dentro da equipe, onde a aplicação do BIM se mostra vantajosa, funcionando como um ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema eficiente de gerenciamento de projeto. As soluções aqui encontradas são de grande valia não somente para a Draco Volans, mas também para as outras equipes de competição dentro da Universidade de Brasília, pois mesmo que contidas em um ecossistema acadêmico e experimental, apresentam diversas semelhanças com as respectivas versões comerciais dos seus produtos.

Palavras-chave: BIM, Aerodesign, PLM, Gerenciamento de Projetos.

Abstract

BIM (*Building Information Modelling*) is a project development and management methodology, based on the use of computational tools, with the objective of ensuring integral communication between professionals throughout the product's life cycle. This methodology has been under development for over 40 years, and has always had a strong focus on Civil Construction. However, it was from the beginning of the 21st century that its popularity has increased in Mechanical Engineering as well. The purpose of this Project is to study the feasibility of this connection, focusing on an Aerodesign Environment, considering the already consolidated project management methods, such as PLM. The study is directed to the Aerodesign modality and can be widened to others competition teams throughout UnB, like Baja and Apuama Racing.

Key-words: BIM, Aerodesign, PLM, Project Management.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 O BIM E O GERENCIAMENTO DE PROJETOS 3

2.1 HISTÓRIA DO BIM 3
2.2 O QUE É A METODOLOGIA BIM 4
2.2.1 A REDUÇÃO DE CUSTOS COM O BIM 5
2.2.2 SOFTWARES COMPATÍVEIS 5
2.2.3 NÍVEIS DE COMPETÊNCIA DO BIM 7
2.3 O BIM NO BRASIL 10
2.3.1 AUTARQUIAS ENVOLVIDAS NO PROJETO 10
2.4 O ENSINO DO BIM NO BRASIL E NO MUNDO 11
2.5 APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL 11
2.6 APLICAÇÕES NA ENGENHARIA MECÂNICA 13
2.7 PLM - *Product Lifecycle Management* 14
2.7.1 EXEMPLOS DE SOFTWARES PLM 14
2.7.2 PDM - *Product Data Management* 15
2.8 COMPARAÇÃO ENTRE BIM E PLM 16
2.9 O BIM NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA 17
2.10 A REALIDADE ESTENDIDA (RE) APLICADA AO BIM - REALIDADE VIRTUAL (RV) E REALIDADE AUMENTADA (RA) 18
2.10.1 APLICAÇÕES DE RV E RA NA ENGENHARIA CIVIL E MECÂNICA 19

3 O PROJETO DE AERONAVES E O AERODESIGN 22

3.1 A EVOLUÇÃO DO PROJETO AERONÁUTICO 22
3.2 ETAPAS DO PROJETO AERONÁUTICO 26
3.3 PARTES DE UMA AERONAVE 27
3.3.1 FUSELAGEM 28
3.3.2 ASAS 28
3.3.3 EMPENAGEM 29
3.3.4 TREM DE POUSO 30
3.3.5 GRUPO MOTO-PROPULSOR 30
3.4 PROJETO CONCEITUAL DE UMA AERONAVE 31
3.4.1 MISSÃO DE VOO 32

3.4.2 Projeto Aerodinâmico 33
3.4.3 Projeto do Grupo moto-propulsor 34
3.4.4 Projeto de Desempenho 35
3.4.5 Projeto de Estabilidade 35
3.4.6 Projeto Estrutural 36
3.4.7 Análise de Custos 37
3.5 O Projeto Aeronáutico e o Aerodesign 38
3.6 O Gerenciamento de Projeto no Aerodesign 42
3.6.1 Alguns problemas encontrados pela equipe 44

4 Avaliação do uso do BIM no Aerodesign 45
4.1 Fluxo de Projeto da Equipe Draco Volans 45
4.1.1 Desenho, Aerodinâmica e Estabilidade 46
4.1.2 Desenho e Estrutura 46
4.1.3 Desenho, Elétrica e Desempenho 47
4.1.4 Desenho e Manufatura 47
4.2 As dimensões do BIM aplicadas ao Aerodesign 48
4.2.1 3ª dimensão: Renderização Tridimensional 48
4.2.2 4ª dimensão: Cronograma 49
4.2.3 5ª Dimensão: Orçamentação 50
4.2.4 6ª Dimensão: Sustentabilidade 52
4.2.5 7ª Dimensão: Gestão das Instalações 52
4.2.6 8ª Dimensão: Segurança 53
4.2.7 9ª Dimensão: Construção Enxuta *(Lean Construction)* 54
4.2.8 10ª Dimensão: Construção Industrializada 55
4.3 Aplicações práticas no projeto 56
4.3.1 Metodologia para otimização do tempo e custos do projeto . 56

5 Conclusões e Comentários 60

Referências Bibliográficas 62

LISTA DE FIGURAS

2.1 Ilustração das 7 dimensões principais do BIM. (Atrium Engenharia Jr., 2021) . 9
2.2 Centro Cultural da Juventude de Nanjing, China. (Hufton + Crow, 2020). 12
2.3 Campus Central de Inovação de Taiwan. (Bio-architecture Formosana, 2020) . 12
2.4 Biblioteca Nacional de Sejong City, Coreia do Sul. (Young Chae Park, 2020) . 13
2.5 Renderização e esquema da estrutura utilizada para a construção do terminal do Aeroporto Internacional de Chennai, Índia. (Young Chae Park, 2020) 17
2.6 Fotogrametria da estrutura do trem de pouso principal do projeto de Aerodesign de 2019, da equipe Draco Volans - feita com imagens da câmera do celular, depois renderizado no software Blender. 20

3.1 Sikorsky Ilya Muromets, Rússia. (Canal Piloto Bianch, 2014) 23
3.2 (a) Junkers F13, Alemão; (b) Boeing 247, Norte-americano.(Blog Airway, 2017) 23
3.3 (a) Boeing 307, Norte-americano.; (b) De Havilland Comet, Inglês; (c) Concorde, Franco-britânico. (Blog Airway, 2017) 24
3.4 Comet 1, em exposição em *Royal Air Force Museum Cosford*, Cosford, UK ... 25
3.5 (a) Falha na estrutura da cabine do Havilland Comet, pelo efeito da fadiga dos materiais da estrutura; (b) Falha ocorrida na região de uma das janelas da aeronave; (Paul Withey, b, 2019) 25
3.6 Detalhamento da sequência de projeto. (Raymer, 1982)..... 27
3.7 Partes constituintes de uma aeronave. (Guia do Aviador, 2014)..... 27
3.8 As partes que constituem uma aeronave. (Rodrigues, 2011) 28
3.9 Diferentes configurações de altura da asa em relação ao solo. (Estevam pelo mundo, 2014)..... 29
3.10 Exemplos de configurações que variam o formato da empenagem. (Terravista Brasil, 2014) 29
3.11 Exemplos de configurações que variam o formato da empenagem. (Terravista Brasil, 2014) 30
3.12 Componentes internos de um Motor Continental, Cessna 152. (Aeropole, 2014) 30
3.13 Etapas do projeto conceitual de uma aeronave. (Raymer, 1982)..... 31
3.14 Esboço inicial da fase de projeto conceitual. Traduzido de (Raymer, 1982)..... 32
3.15 Exemplos de missões de voo. Traduzido de (Raymer, 1982)..... 33

3.16 Procedimento iterativo até o produto final. (Raymer, 1982) 33
3.17 Exemplo de perfil aerodinâmico e suas principais características. (DONINI, 2014) 34
3.18 Simulação de escoamento sobre a asa, adicionando um ângulo de incidência. (NASCIDOS PARA VOAR, 2016) 34
3.19 Força peso atuantes na aeronave e a respectiva distância do ponto de aplicação à hélice. CG = centro de gravidade. Fonte: (Rodrigues, 2011) 36
3.20 Exemplo de processo de otimização estrutural: o formato aerodinâmico da nervura está garantido, mas, internamente, percebe-se que foram feitos alívios de massa, reduzindo o peso das nervuras. (Hangar MMA, 2016)..... 37
3.21 Simulação estrutural dos esforços sofridos durante o voo, no programa Ansys. (Matheus Cardoso, 2016)..... 37
3.22 Esquema de custos de uma aeronave. A altura dos elementos indica a proporção de custos entre si. (Raymer, 1982) 38
3.23 Exemplos de aeronaves construídas para o projeto de aerodesign. 39
3.24 Esquema do trajeto de voo a ser concluído na etapa de competição de voo. (Gustavo da Fonseca, 2016)..... 40
3.25 Foto da equipe Draco Volans de 2019. 41
3.26 (a) Aeronave projetada pela equipe, em 2018; (b) Aeronave em voo. 41
3.27 Renderização da aeronave construída em 2019. 42
3.28 Vista isométrica do conjunto moto-propulsor e trem de pouso da aeronave de 2019..... 43
3.29 Posicionamento das nervuras da asa nos gabaritos, aeronave de 2018. 43
3.30 Exemplos de problemas encontrados após a construção do protótipo, resultantes de lacunas na integração entre duas áreas. 44

4.1 Sólido virtual representando o formato final de uma das asas, projeto 2019, equipe Draco Volans. 46
4.2 Modelo virtual da estrutura do trem de pouso principal, projeto 2019 da equipe Draco Volans. 47
4.3 Cronograma proposto no início do ano de 2019 para o desenvolvimento do projeto de Aerodesign. 50

Simbologia

Símbolo	Significado
BIM	Building Information Modelling
PLM	Product Life-cylce Management
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
CAD	Computer-Aided Design
ADAM	Automated Drafting and MachinerY
IFC	Industry Foundation Classes
DEC	Digital Equipment Corporation
LOD	Level of Development
CDE	Common Data Environment
GSA	General Services Administration
BIMBR	Building Information Modelling Brasil
NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CE-BIM	Comitê Estratégico de Implementação da plataforma BIM
FGV	Fundação Getúlio Vargas
Ibre	Instituto Brasileiro de Economia
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
CCDI	Camargo Correia Desenvolvimento Imobiliário
AVAC-R	Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado e Refrigeração
VPM	Virtual Product Definition
PDM	Product Data Management
CISCEA	Comissão de Implantação do Sistema de Controle do Espaço Aéreo
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
MTOW	Maximum Take-off Weight
RDTE	Research, Development, Test and Evaluation
SAE	Society of Automotive Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
MDF	Medium Density Fiberboard

Capítulo 1

Introdução

O BIM, sigla para *Building Information Modelling*, consiste na utilização da tecnologia computacional de integração de dispositivos para eliminar barreiras entre as diferentes áreas envolvidas em um projeto. Dessa forma, engenheiros, arquitetos, fabricantes e desenvolvedores podem realizar todo o trabalho em conjunto, através de uma mesma interface, em tempo real (Eastman et al., 2009).

Através do BIM, é possível identificar cada detalhe construtivo, fornecendo informações para todos os profissionais envolvidos no projeto. Dados referentes a eficiência energética, mudanças climáticas e consumo de materiais são utilizados para garantir a operação, manutenção e reciclagem da instalação, consequentemente melhorando a eficiência dos gastos e prazos de entrega Anderson Rodrigues (2020).

Essa metodologia está em desenvolvimento há mais de 40 anos e foi pensada, inicialmente, para a Construção Civil (van Nederveen and Tolman, 1992). Desde o início do século XXI, diversos países, incluindo o Brasil, vêm desenvolvendo legislações que orientam a utilização do BIM em obras públicas, pela praticidade e economia de recursos que resultam de sua aplicação (Presidência da República, Secretaria-Geral, 2019).

Apesar da utilização ser mais evidente em obras de Construção Civil, o método já é aplicado em alguns projetos de instalações industriais e, por suas características, nada impede que seja aplicado em outros campos da Engenharia Mecânica. Assim sendo, o segmento escolhido para o presente trabalho, foi o da Indústria Aeronáutica, uma vez que o projeto de aeronaves é desenvolvido por diversas áreas e equipes diferentes de forma paralela, indo ao encontro da proposta do BIM.

Porém, os estudos desenvolvidos não seriam eficientemente aplicados em aeronaves comerciais, pela complexidade envolvida e acessos restritos a informações de projeto. Dessa forma, um projeto de Aerodesign foi tido como equivalente a um projeto aeronáutico comercial, no que diz respeito a etapas de desenvolvimento, mesmo sendo de menor escala.

O Aerodesign é uma modalidade de competição que surgiu nos Estados Unidos em 1986, concebida e realizada pela SAE International, a qual a SAE Brasil é filiada.

O objetivo da competição é introduzir o estudante ao mundo da aviação, por meio do desenvolvimento e construção de uma aeronave radiocontrolada para uma missão de voo. Para atingir esse fim, a equipe deve desenvolver exatamente as mesmas etapas de um projeto aeronáutico comercial. A semelhança com um projeto comercial de larga escala é quase total, o que dá aos alunos uma ótima noção para uma possível atuação na área da aviação, como engenheiros (Edison da Rosa, 2006).

Essa modalidade funciona como um laboratório, onde novas técnicas de simulação, construção e prototipagem podem ser testadas e otimizadas para obter um melhor resultado. Assim, desenvolver o tema de aplicação da metodologia BIM no Aerodesign também significa desenvolver essa metodologia para a Indústria Aeronáutica, mesmo que em uma menor escala.

Portanto, este projeto de graduação tem como objetivo avaliar a viabilidade da aplicação do BIM no projeto de aeronaves experimentais para competição de Aerodesign da SAE Brasil. Considerando que na indústria mecânica outras ferramentas de gerenciamento de projeto, como o PLM (Product Life-cylce Management) (Siemens, b, 2020), são utilizadas em larga escala, essas ferramentas também são consideradas nesse projeto de graduação paralelamente ao BIM. Logo, a comparação entre elas também é objeto deste trabalho.

De modo a se atingir esse objetivo foi feito um estudo detalhado da metodologia BIM, que não é assunto tradicional dos cursos de Engenharia Mecânica, bem como do PLM. Focou-se nos usos dessas metodologias na indústria mecânica. Em seguida, aproveitando de minha experiencia como Coordenador de Desenho e Projeto na Equipe Draco Volans de Aerodesign da UnB, foi feita uma análise do fluxo de projeto da Equipe observando como as dimensões do BIM poderiam ser implementadas. Por fim, foram listadas as sugestões de implementação, destacando as vantagens que trariam para o projeto de Aeronaves para a competição de Aerodesign.

O texto está organizado como segue. O capítulo 2 apresenta detalhes sobre a metodologia BIM e em qual estado de desenvolvimento ela se encontra atualmente. O capítulo 3 apresenta a sequência do projeto de uma aeronave, assim como o objeto de estudo de cada área. Em seguida, o capítulo 4 apresenta a metodologia de trabalho, com foco na comparação entre o BIM e o PLM e as contribuições do estudo para a modalidade de Aerodesign. Por fim, o capítulo 5 versa sobre as conclusões obtidas e as próximas etapas de projeto, seguido das referências bibliográficas utilizadas.

Capítulo 2

O BIM e o Gerenciamento de Projetos

Neste capítulo, está apresentado o BIM, assim como outras metodologias de gerenciamento de projetos usadas na engenharia mecânica. Uma atenção especial é dada ao BIM, por ser tema deste Projeto de Graduação, mas é interessante apresentar outras metodologias e ferramentas já utilizadas na indústria. Aqui, procura-se destacar não apenas a história e aspectos técnicos das metodologias mas também suas aplicações na Engenharia Mecânica e na Indústria Aeronáutica.

2.1 História do BIM

O desenvolvimento de projetos na indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) vem evoluindo ao longo dos séculos, acompanhando o avanço da tecnologia. Os primeiros registros de desenhos técnicos surgiram na época do Renascimento, no século XV. Um ótimo exemplo disso é Leonardo da Vinci, que fazia desenhos descrevendo os mecanismos de suas máquinas antes de construí-las, incluindo vistas de diversas perspectivas.

Porém, foi com a revolução industrial, no século XVII, que o desenho técnico começou a ser desenvolvido de forma acelerada, pela necessidade de velocidade na produção. Nesse mesmo período, um grande matemático francês, Gaspard Monge (1746-1818), tido como o pai da geometria referencial, formulou as primeiras regras da Matemática Descritiva, que é a base do desenho técnico. A evolução das máquinas foi essencial para tal, pois os desenhos passaram a abarcar mais de uma vista de um mesmo objeto, detalhes construtivos e proporções mais rigorosas.

Após isso, os computadores tomaram o lugar das pranchetas e passaram a desempenhar um importante papel na confecção dos desenhos técnicos. Em 1957, nos EUA, o cientista da computação Patrick J. Hanratty introduziu o primeiro software de CAD (*Computer-Aided Design*), o *Automated Drafting and Machinery*, ou ADAM, disponível de forma restrita a estações de trabalho fixas. Em 1981, ocorreu o lançamento do primeiro computador pessoal, o PC IBM, o que melhorou a acessibilidade, resultando na criação do AutoCAD, em 1983.

Na década seguinte, Giles A. Neverdeen e Frits P. Tolman publicaram o artigo *Automation in Construction*, sendo o primeiro uso do termo "BIM"(*Building Information Modelling*) como se conhece hoje. (van Nederveen and Tolman, 1992)

Portanto, percebe-se que o BIM está em desenvolvimento há mais de 40 anos. Entretanto, é fato que a indústria de AEC é bastante resistente a mudanças: processos que estão bem definidos e que funcionam não dão motivos evidentes para serem modificados. A realidade mostra que é preciso uma transformação na demanda para que haja uma mudança significativa, pois é difícil alterar as condições de fabricação de um produto diante de uma produção incessante. Fenômenos como revoluções industriais, guerras mundiais e crises financeiras são momentos onde ocorre uma drástica alteração de demanda por velocidade e quantidade de produção, influenciando todos os processos industriais. Atualmente, o mundo passa por um desses momentos, onde a crise econômica/política mundial causada pelo Coronavírus fez com que vários processos fossem repensados e aprimorados.

2.2 O que é a metodologia BIM

Agora, é necessário entender o que essa nova forma de desenvolvimento de projeto representa e o porquê dessa prática requerer um certo nível de mudança nos processos industriais. O BIM, sigla para *Building Information Modelling*, consiste na utilização da tecnologia computacional de integração de dispositivos para eliminar barreiras entre as diferentes áreas envolvidas em um projeto. Dessa forma, engenheiros, arquitetos, fabricantes e desenvolvedores podem realizar todo o trabalho em conjunto, através de uma mesma interface, em tempo real (Eastman et al., 2009).

Porém, o BIM não é apenas uma representação tridimensional de um conjunto de peças. Através dessa ferramenta, é possível identificar cada detalhe construtivo, fornecendo informações para todos os profissionais envolvidos no projeto. Dados referentes a eficiência energética, mudanças climáticas e consumo de materiais são utilizados para garantir a operação, manutenção e reciclagem da instalação, consequentemente melhorando a eficiência dos gastos e prazos de entrega Anderson Rodrigues (2020).

Outra questão que o BIM propõe resolver, é a comunicação entre os profissionais. Em muitas empresas e escritórios de engenharia, ainda há o problema de cada área de projeto trabalhar de forma independente e, quando se reúnem para finalizar o projeto, não há um consenso sobre as modificações que devem ser feitas, necessitando de várias iterações e retrabalhos até que o produto final esteja bem definido. A solução encontrada foi o uso de um tipo de arquivo computacional comum a todos os programas de modelagem, ponto que será melhor explorado na seção 2.2.2

Dessa forma, o BIM consiste em uma ferramenta computacional criada para aumentar a praticidade do desenvolvimento de um projeto. Envolve todas as áreas em uma única linguagem computacional capaz de fazer a leitura de todos os dados relevantes para o desen-

volvimento, construção e manutenção de um projeto de engenharia, o que garante a compatibilidade entre todos os arquivos gerados.

2.2.1 A redução de custos com o BIM

O critério mais importante para um projeto e sua viabilidade é estar dentro do orçamento do cliente. Nesse quesito, o BIM tem uma atuação bastante efetiva, como exemplificado abaixo (Siemens, a, 2021).

- Para sócios e investidores: um levantamento de dados feito pela *Siemens* mostra que cerca de 30% das obras de construção civil extrapolam o orçamento previsto no projeto. O alto nível de transparência do projeto faz com que o retorno sobre o investimento seja avaliado e maximizado, resultando em 10% a 20% de economias operacionais e redução de cerca de 7% no tempo de execução;
- Para empreiteiros e equipes terceirizadas: sabe-se que a adoção do BIM resulta em uma redução de até 40% dos gastos não previstos em projeto. Isso se deve à digitalização total, uma vez que todos os agentes têm acesso aos arquivos e ficha técnica dos elementos da obra, reduzindo custos e possíveis atrasos no cronograma;
- Para os clientes: pelo fato de 80% dos custos envolvidos no ciclo de vida serem referentes à fase de operação, o alto nível de adaptabilidade do projeto possibilita mudanças de acordo com as exigências dos clientes. Com todos os processos mapeados da forma como o BIM propõe, é possível observar uma redução de até 9% dos custos operacionais;
- Para os operadores: a análise de dados e simulações melhoram a qualidade operacional, mostrando onde está o problema e como resolvê-lo. Outra vantagem é a facilidade de acesso às informações, reduzindo exponencialmente o tempo de execução;
- Para os administradores: o gerenciamento do projeto como um todo, em tempo real, através de uma única interface, melhorando o gerenciamento geral;

2.2.2 Softwares compatíveis

O primeiro software a implementar essa mudança e disponibilizá-la para o público foi o *ArchiCAD*, lançado em 1987 pela *Diehl Graphsoft*, somente para plataformas *Apple*, onde a ideia principal do programa era a criação de um "edifício virtual". Paralelamente, a *Tekla* desenvolvia um banco de dados virtual, contendo informações sobre os custos e fornecedores. A grande oportunidade que o avanço tecnológico proporcionou foi a extrapolação do espaço bidimensional. Nesse momento da história, os programas de computador já eram capazes de renderizar imagens em três dimensões(Anderson Rodrigues, 2020)

O próximo grande passo rumo à aplicação generalizada do BIM ocorreu em 1992, com a ideia da interoperabilidade dos *softwares* de modelagem computacional, presentes no mercado há alguns anos. Assim ocorreu, pois seria impossível a criação de uma empresa que monopolizasse o cenário, ainda mais em um mercado consolidado. Dessa forma, G.A van Nederveen e F. Tolman, no artigo *Automation in Construction* identificaram esse cenário, propondo a criação de um único tipo de arquivo, capaz de ser lido por todos os *softwares* já existentes. (van Nederveen and Tolman, 1992)

A indústria AEC acatou a proposição dos pesquisadores e, em 1995, a *Autodesk*, em associação com mais 12 companhias de Construção Civil, desenvolveu um tipo de arquivo que contém os dados de todos os processos que levaram à modelagem de um componente, cuja extensão é ".ifc", sigla para *Industry Foundation Classes*. Assim, o arquivo de uma parede, por exemplo, carrega informações sobre o número de tijolos que serão empregados, a quantidade de cimento e quantos litros de tinta devem ser usados na sua construção. Essas informações serão utilizadas por todas as empresas envolvidas, resultando em uma estimativa quase exata do custo final. Como o objetivo era difundir a nova ferramenta, essa funcionalidade foi implementada sem custo algum, por meio de uma atualização de *firmware*, apenas.

Atualmente, o *software* mais comum para a implementação do BIM é o *Revit*, da *Autodesk*. Porém, existem outros, como o *Naviswork* e *AutoCAD*, também da *Autodesk*, o *ArchiCAD*, da *Graphisoft* e o *SketchUp*, da *Trimble*. O *Catia* e o *Solidworks*, (ambos da *Dassault Systèmes*), mais comuns, também possuem integração com o IFC, porém ainda pouco explorada.

Contudo, existe um problema que sempre acompanhou as tarefas computacionais, em todas as etapas da sua evolução, que é a limitação do poder computacional. Por muitas vezes na história, tarefas que precisavam de muito poder computacional só podiam ser executadas em estações de trabalho fixas, como os "minicomputadores"da *DEC*, em 1964, e a *Calma Digitizer*, em 1965. Hoje, *softwares* de modelagem 3D são muito difundidos e podem ser executados em praticamente qualquer computador pessoal.

Porém, o poder de processamento ainda é um limitador para o nível de detalhe desejado em uma representação virtual, sem que ocorram gargalos de desempenho. Para que isso não limite o projetista, os softwares possuem um sistema de simplificação de geometrias e características, chamado de LOD (*Level of Development*), que varia de 100 a 500. No nível mais baixo, LOD 100, o componente é representado com uma geometria simplificada, com poucas informações agregadas. No outro extremo, uma representação em LOD 500 mostra todas as características do componente, tanto visuais quanto informacionais. Esse último nível seria ideal para todas as representações BIM, porém há a limitação do hardware, levando os projetistas a adaptarem o LOD ao poder computacional que têm em mãos.

2.2.3 Níveis de competência do BIM

Infelizmente, não é todo projeto que vai conseguir abarcar 100% daquilo que o BIM proporciona, seja por limitações de processamento ou nível de exigência do trabalho. Dessa forma, existem 4 níveis de aplicação, dados por:

- Nível 0: também chamado de Pré-BIM, aqui estão os projetos que empregam apenas desenhos 2D em seu desenvolvimento, não exigem um alto nível de complexidade, mas, contém todas as informações pertinentes;
- Nível 1: aqui já estão presentes as representações 3D, porém são desenvolvidas por cada área separadamente. Os arquivos estão em repositório em comum, naquilo que se chama de Ambiente Comum de Dados - CDE (*Common Data Environment*);
- Nível 2: percebe-se um bom nível de interoperabilidade entre os profissionais, onde o tipo de arquivo utilizado é o "IFC", para todos;
- Nível 3: é o estágio de aplicação integral do BIM, envolvendo todas as dimensões que serão explicadas a seguir. Aqui também surge o conceito de *i*BIM, pela integração com a Nuvem, possibilitando o acesso em qualquer dispositivo e local.

Após o espaço 3D estar completamente dominado, outras demandas de projeto foram surgindo e hoje percebe-se que o BIM consegue abarcar diversas outras esferas, também chamadas de dimensões, que estão elencadas na Figura 2.1 (United-BIM, 2020)

- 4ª Dimensão - Cronograma

No momento em que essa dimensão é aplicada ao projeto, passa a ser possível prever a duração de todas as etapas da construção, além de como o projeto será constituído ao longo do tempo. Não somente isso, mas o tempo de instalação de sistemas externos e o prazo para que o projeto atinja a operabilidade são dados extremamente relevantes para fornecedores, contratantes e engenheiros.

Como um exemplo, a *GMW Computers* desenvolveu, em 1986, o *software RUCAPS*, como o primeiro programa a utilizar o conceito de faseamento temporal. A sequência de modelagem corresponde ao avanço da construção, onde prazos são definidos para cada etapa também definidas desde o início. A aplicação inicial foi na construção faseada do Terminal 3 do aeroporto de Heathrow, em Londres.

- 5ª Dimensão - Orçamentação

Com as informações que os próprios componentes de montagem carregam, como especificação de materiais e fornecedor, é possível estimar o custo do projeto, desde sua fase inicial.

Assim, é possível fazer o monitoramento em tempo real e, caso haja necessidade de uma alteração do orçamento, os elementos podem ser substituídos ou retirados do escopo. E isso se aplica não somente do trabalho como um todo, mas de todos os componentes empregados, de forma automática.

- 6ª Dimensão - Sustentabilidade

Por ser um tema que está atualmente no centro das atenções, a sustentabilidade é imprescindível em um projeto. Informações sobre custos ambientais, como o consumo de água e energia devem ser exploradas, para que, em uma fase de otimização, resultem no menor impacto ambiental possível. No longo prazo, há um baixo consumo energético que pode ser otimizado constantemente, com a possibilidade de avaliação de alternativas de projeto.

Outro ponto interessante é a estrutura da instalação, que também é monitorada pela 6ª dimensão. Dados sobre a vida útil de um componente pode dizer com elevada precisão quando a manutenção deverá ser feita, ou com qual frequência, a fim de evitar problemas e estender a vida útil.

Dessa forma, tem-se um projeto com características físicas determinadas, tempo de desenvolvimento estimado, custos razoavelmente definidos e com informações energéticas e ambientais definidas. Ao otimizar o processo até aqui, é possível alcançar um nível satisfatório de evolução, no que diz respeito à construção da instalação. Porém mais duas dimensões são adicionadas, para garantir a boa operabilidade.

- 7ª Dimensão - Gestão das Instalações

Nesta etapa estão as informações que contribuem para uma operação eficiente, que possibilitam que isso continue por anos, independente da geração de profissionais encarregados da gestão. Aqui encontram-se manuais de operação, instalação e manutenção, especificações técnicas e cronograma de inspeção.

Uma boa aplicabilidade das 7 dimensões resulta em uma estrutura física eficiente e bem trabalhada já na fase de projeto, que será concluída em um tempo hábil, com baixa chance de ocorrência de contratempos. Terá um custo dentro do orçamento do contratante e estará de acordo com as normas ambientais locais, mantendo a integridade física intacta mesmo após anos de operação. Eventualmente, erros nos processos ocorrerão, porém, um plano de manutenção e de reparo estarão bem desenhados e prontos para ser aplicados. Os fornecedores serão conhecidos e toda informação pertinente será acessada em tempo real por todos os profissionais envolvidos.

É importante citar que os profissionais são igualmente capazes para desenvolver um projeto sem o uso da metodologia BIM. Porém, a maior vantagem na sua aplicabilidade está na maior eficiência de planejamento, gastos, manutenção, operação, ciclo de vida e, principalmente, do tempo necessário para desempenhar todas essas tarefas.

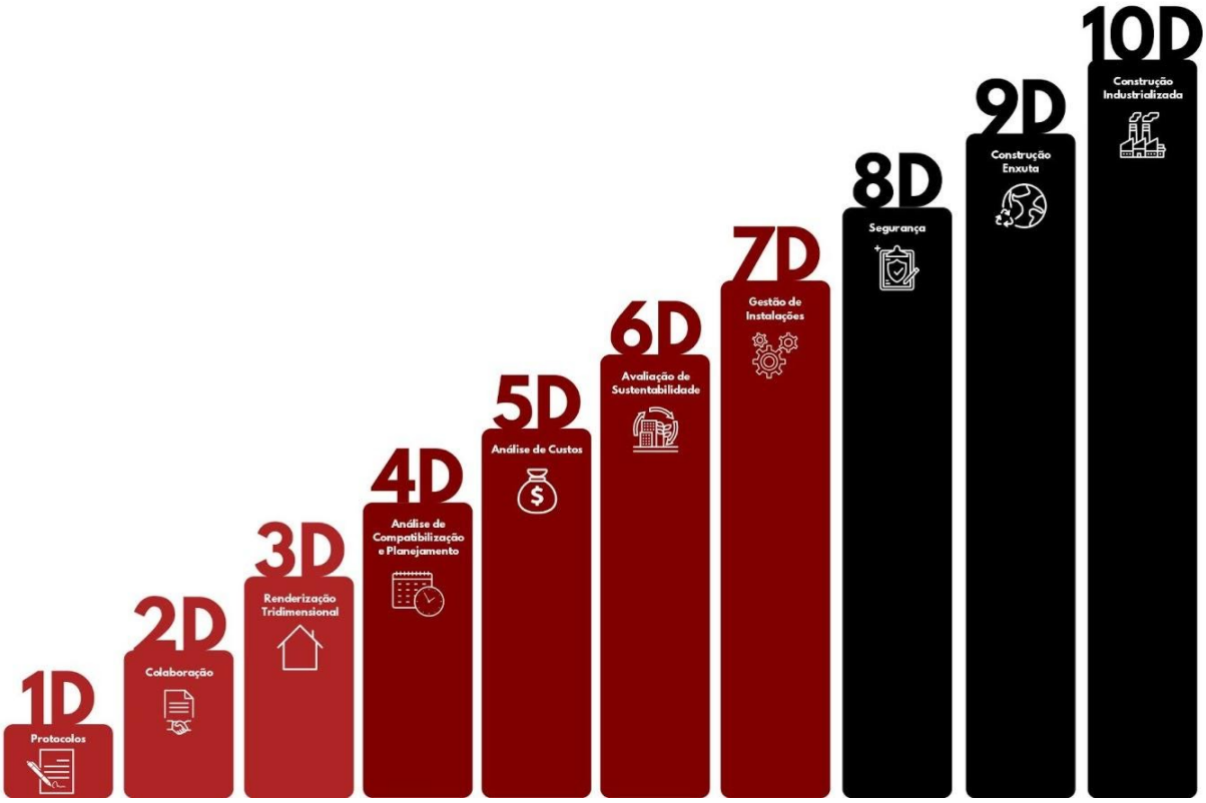


Figura 2.1: Ilustração das 7 dimensões principais do BIM. (Atrium Engenharia Jr., 2021)

Outras três dimensões estão sendo desenvolvidas, porém ainda em um estágio inicial de implementação. São elas: (Ibec Ensino, 2021)

- 8ª Dimensão - Segurança

Compreende a preocupação com a segurança do trabalho, tem o objetivo de garantir a presença de informações que garantam o cumprimento das normas de Higiene e Segurança do Trabalho, para que as chances de ocorrência de acidentes sejam reduzidas ao máximo.

- 9ª Dimensão - Construção Enxuta (*Lean Construction)*

Na 3ª dimensão há a preocupação com um projeto tridimensional funcional e bem feito. Porém, aqui o foco é a eficiência desse processo, para evitar todo tipo de desperdício e excessos, ainda assim garantindo a funcionalidade e boa operação da proposta.

- 10ª Dimensão - Construção Industrializada

Este último ponto dá importância ao BIM como uma metodologia ampla, que engloba a responsabilidade para com o desenvolvimento da indústria. O foco desta dimensão é explorar formas de padronização do processo, para possibilitar a replicabilidade do modelo, seja por meio de um software específico, processo ou técnicas de modelagem.

2.3 O BIM no Brasil

Por outro lado, é necessário fazer com que essa ferramenta seja amplamente utilizada, a fim de integrar o máximo de sistemas possíveis e minimizar cada vez mais os gastos desnecessários. Dessa forma, vários países do mundo, inclusive o Brasil, estão implementando normas e regulamentações para garantir que o BIM seja utilizado em seus territórios.

Nos EUA, por exemplo, tornou-se obrigatória sua utilização em projetos de obras públicas custeadas pela GSA (*General Services Administration*) em 2006. Em Singapura ocorreu o mesmo em 2008, na Noruega, em 2011, na Finlândia, em 2014 e na Coreia do Sul, em 2016.

2.3.1 Autarquias envolvidas no projeto

No Brasil, da mesma forma, há uma evolução na aplicação da metodologia e a esfera pública tem grande protagonismo nessa trajetória, principalmente o Ministério da Infraestrutura. Em 2018 foi feito um decreto presidencial que definiu o programa "BIM BR- Estratégia Nacional para a Disseminação do BIM. Nesta estratégia, há um prazo de 10 anos, dividido em 3 etapas, para que o método seja implementado de uma forma mais eficiente nas obras públicas. Até 2021, o BIM deve ser utilizado para a fase de projeto; até 2024, para a fase de construção e até 2028, para a fase de pós-obra, manutenção e operação. Inclusive, com a finalidade de difundir ainda mais o projeto, foi criada a plataforma BIMBR, onde é possível encontrar a "Biblioteca Nacional BIMBR", repleta de componentes tridimensionais, como portas, janelas, paredes, válvulas e dutos, aumentando ainda mais a acessibilidade. (Presidência da República, Secretaria-Geral, 2019)

Em 2011, a Associação Brasileira de Normas Técnicas criou a NBR 15965, que dispõe de um sistema de classificação das informações para a padronização da nomenclatura. Essa norma teve origem em normas norte-americanas e canadenses, o que mostra a concordância com o cenário mundial.

Outra entidade que contribui para o cenário é o Comitê Estratégico de Implementação da plataforma BIM (CE-BIM), composto por representantes dos seguintes órgãos: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços; Casa Civil da Presidência da República; Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações; Ministério das Cidades; Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão; Ministério da Defesa e Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos da Secretaria-Geral da Presidência da República (Sienge, 2021).

O plano de ação do Comitê, para auxiliar a disseminação e adoção por parte das empresas são:

- Coordenar a estruturação do setor público para adotar a plataforma BIM;

- Criar condições favoráveis para o investimento, público e privado;
- Estimular a capacitação dos profissionais;
- Propor normas que estabeleçam parâmetros para as compras e as contratações públicas;
- Desenvolver normas técnicas, guias e protocolos específicos sobre a plataforma BIM;
- Desenvolver a Plataforma e a Biblioteca Nacional BIM;
- Estimular o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias relacionadas ao BIM;
- Incentivar a concorrência no mercado por meio de padrões neutros de interoperabilidade.

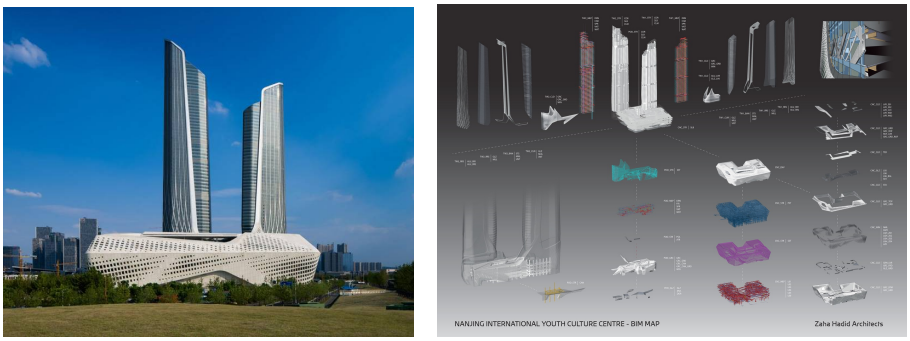
A expectativa do Comitê Estratégico de Implementação é que 50% do PIB gerado pela construção civil em 2024 seja de projetos baseados em BIM e, atualmente, 9,2% das empresas de construção civil o empregam, segundo um estudo do Instituto Brasileiro de Economia (Ibre) da Fundação Getúlio Vargas (FGV). Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), espera-se que haverá um aumento de 10% na produtividade do setor, com uma redução de custos de 20% e, se adotado em metade da cadeia de produção, já resultaria em um aumento de 7% do PIB do setor, até 2028. (Governo Federal, 2018)

Vários estados também estão acompanhando a evolução, através de decretos que garantem o uso do BIM em obras estaduais, como Bahia e Santa Catarina. A própria UnB tem parceria com a *Valec* (empresa estatal de engenharia, construção e operação de ferrovias), para integração do desenvolvimento de ferrovias por meio do BIM a informações geográficas locais (Washington Luke, 2021).

2.4 O Ensino do BIM no Brasil e no mundo

2.5 Aplicações na Engenharia Civil

Historicamente, o BIM foi pensado para a Indústria de Construção Civil, pois é uma das linhas de frente do desenvolvimento humano e bem-estar da população. Por exemplo, o Centro Cultural da Juventude de Nanjing, na China (Figura 2.2) foi o primeiro edifício construído em duas direções simultâneas no país - começando no térreo e avançando ao mesmo tempo para cima e para baixo. Foi inaugurado em tempo recorde de 34 meses, com o BIM sendo um ponto determinante na organização .



(a) As duas torres do complexo cultural. (b) Diversos sistemas independentes desenhados em conjunto.

Figura 2.2: Centro Cultural da Juventude de Nanjing, China. (Hufton + Crow, 2020).

No caso do Campus Central de Inovação de Taiwan (Figura 2.3), o objetivo adicional foi reduzir em 10% a compensação total de carbono durante a fase de construção. Para isso, o sistema BIM foi usado na análise da eficiência da operação, incorporando informações climáticas, térmicas e energéticas de todas as superfícies.

Figura 2.3: Campus Central de Inovação de Taiwan. (Bio-architecture Formosana, 2020)

Como último exemplo, a Biblioteca Nacional de Sejong City, na Coreia do Sul, teve elementos estruturais modelados com BIM (Figura 2.4). O foco esteve nas simulações de pré-construção e interoperabilidade entre as várias disciplinas, fabricação dos painéis de formatos únicos e sistemas *curtain wall*, que foram fundamentais para as geometrias originais deste projeto.

Figura 2.4: Biblioteca Nacional de Sejong City, Coreia do Sul. (Young Chae Park, 2020)

No Brasil, algumas empresas se destacam pela adoção do BIM em seus processos, resultando em melhorias significativas na eficiência dos trabalhos. Uma delas é a Camargo Correia Desenvolvimento Imobiliário (CCDI), que investiu cerca de R$2 milhões no desenvolvimento do *SigPro* (Sistema Integrado de Gestão de Projetos). Com esse sistema, todas as atividades de planejamento e controle passaram a ser feitas através do BIM, com todas as informações disponíveis nos tablets dos agentes de campo. Dessa forma, os planejamentos atingiram uma marca de 90% de aderência e os orçamentos tiveram assertividade de 99%.

Na Sinco Engenharia, a metodologia foi além da criação de modelos tridimensionais ao fazer um uso extensivo da quarta dimensão, de planejamento. A ação rendeu o prêmio Master Imobiliário em 2017, na categoria Boas Práticas na Aplicação de Recursos Tecnológicos e, desde 2011, a empresa utiliza essa linha de trabalho.

Fazendo um bom uso da quinta dimensão, que versa sobre orçamento, duas empresas se destacaram: a construtora Edalco e a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp. Ambas conseguiram montar um sistema de quantificação de gastos em tempo real, com retroalimentação automática de informações. A maior consequência dessa prática foi o aumento da eficiência e credibilidade das empresas perante investidores, clientes e população. (Juliana Nakamura, 2018)

2.6 Aplicações na Engenharia Mecânica

Atualmente, o BIM é amplamente empregado na Construção Civil, como foi visto anteriormente. Porém, na Indústria Mecânica, sua aplicação está concentrada principalmente no projeto de instalações centrais de *AVAC-R*. Portanto, um estudo para a aplicação neste segmento é essencialmente válido, visto que o processo construtivo também se encaixa na proposta de interoperabilidade das áreas.

Contudo, a necessidade de um software para o gerenciamento dos projetos levou os desenvolvedores a criarem soluções para controlar o andamento dos trabalhos dentro da própria empresa. Alguns softwares, inclusive, possuem ferramentas pontuais já inclusas na própria

interface para levantamento de dados. A indústria mundial dá, a essa prática, o nome de *Product Lifecycle Management*, ou PLM (gerenciamento do ciclo de vida do produto) (Desktop Engineering, 2021).

2.7 PLM - *Product Lifecycle Management*

O *Product Lifecycle Management*, ou PLM, é o nome dado à solução encontrada pelas empresas para fazer o gerenciamento de projeto e surgiu por volta de 1980, no mesmo período que o BIM. O PLM foi criado, inicialmente, com o intuito de gerenciar arquivos gerados por softwares de CAD, mas acabou evoluindo e tornou-se mais abrangente. Com o PLM, é possível utilizar e reutilizar documentos de projeto, criação de banco de dados de elementos virtuais, procedimentos de manutenção, layout, linha de montagem e automação de processos. A grande questão é que, geralmente, não está inclusa a confecção de modelos virtuais, ou seja, não funciona como um software de CAD e sim de administração e gestão (Siemens, b, 2020).

2.7.1 Exemplos de Softwares PLM

A ferramenta de gerenciamento de projeto que o Catia utiliza, é chamada de Enovia. O Catia é um software de CAD (*Computer Aided Design*), CAM (*Computer Aided Manufacturing*) e CAE (*Computer Aided Engineering*) bastante usado para desenvolvimento de produtos, desde embalagens e equipamentos médicos a automóveis e aeronaves. Também é possível, através de licenças específicas, realizar análise em elementos finitos, projetos elétricos, projetos em materiais compósitos e programar uma manufatura aditiva por CNC. Aqui, o Enovia tem papel de gerenciamento completo do projeto, incluindo banco de dados, intercomunicação entre as áreas e planos de operação e manutenção. Este software, especificamente, chama o PLM de VPM, ou *Virtual Product Definition* (Definição do Produto Virtual), por ir um pouco além das aplicações do PLM (Dassault Systèmes, 2021).

É notório dizer que o Catia tem grande importância para este Projeto de Graduação, pois foi criado em associação com uma empresa de aviação, em 1977, e por ser amplamente utilizado em companhias como Boeing, Airbus, Bombardier e na brasileira Embraer, atestando a aplicabilidade das metodologias de gerenciamento de projetos, usando ferramentas digitais, no segmento.

Outro software de modelagem 3D bastante utilizado é o *Creo Prametric*, da PTC. Este é concorrente direto do Catia e possui o próprio sistema integrado de PLM, chamado de *PTC Windchill*. Uma grande vantagem que a PTC tem sobre o Catia é a integração com a tecnologia Ansys, para simulações estruturais, modais, térmicas e de mecânica dos fluidos. O Grupo Volvo, companhia sueca do ramo de caminhões e ônibus, faz uso destas ferramentas (Digital Engineering 247, 2021). O PTC *Windchill* atua na fase de projeto, análise do produto, ges-

tão da qualidade, informações de operação e manutenção, colaboração entre os profissionais envolvidos e pode ser utilizado em dispositivos móveis (PTC, Creo Parametric, 2021).

Por fim, o *Teamcenter* é a plataforma de PLM mais usada no mundo, constituindo um sistema PLM multi-cad, onde arquivos vindos de vários softwares podem ser lidos e avaliados em tempo real. Alguns softwares compatíveis são: Catia, Solidworks, Inventor, Autocad e Creo. A plataforma é acessada através de um endereço de internet próprio, que pode ser usado por todos os agentes envolvidos, a fim de visualizar o modelo, cronograma do projeto e curso das atividades (Siemens Software, 2017).

2.7.2 PDM - *Product Data Management*

Dentro do PLM, existe uma divisão responsável por estocar todas as informações pertinentes ao produto, ou seja, dados sobre projeto e fabricação dos componentes. A essa divisão dá-se o nome de *Product Data Management*, ou PDM (Autodesk, 2021). Através do uso dessa ferramenta, por um repositório de arquivos, os agentes conseguem controlar revisões no sistema, com dados sobre cada componente e o nível de sua maturidade dentro do projeto (Camila Casarotto, 2021). As funcionalidades são várias:

- Manter os padrões de qualidade: é feito o registro dos dados usados no projeto, propondo a substituição de um componente;
- Acelerar respostas ao mercado: a organização dos dados e fácil acessibilidade garantem agilidade (reduz o *time-to-market*);
- Facilita a colaboração entre as equipes: os profissionais têm acesso ao repositório geral, sob uma mesma linguagem de comunicação entre fornecedores, engenheiros e vendedores;
- Aumentar a segurança dos dados: como todos os arquivos encontram-se em um repositório virtual, hospedado em servidores dedicados, as chances de perdas de arquivos diminuem drasticamente;

A gestão dos dados de projeto é muito importante, pois, se adotada corretamente, pode economizar milhares de dólares para as empresas, apenas no reaproveitamento de dados de projeto anteriores. Ainda, uma boa gestão de dados é capaz de fornecer informações valiosas sobre a relação com os clientes, como preferências, etapas anteriormente aprovadas, histórico de produtos de sucesso, entre outros. As grandes empresas de tecnologia como Netflix, Facebook e Google são capazes de identificar exatamente o que o usuário deseja, mesmo sem ele ter externalizado tal informação, por exemplo, somente devido à gestão de dados (Siemens, a, 2021).

Portanto, percebe-se que, na Indústria atual, existem ferramentas de gerenciamento de projeto eficientes e que abarcam todas as etapas do ciclo de vida do produto. Todavia, percebe-se que esse processo funciona para procedimentos internos à empresa, apenas, e, para que exista uma interoperabilidade entre os demais agentes da cadeia de produção, é necessário uma integração da linguagem computacional. O BIM é capaz de auxiliar nessa questão, ao utilizar um único formato de arquivo para desempenhar suas funcionalidades.

Logo, no Capítulo 4 está apresentado um estudo mais aprofundado da associação entre as metodologias, seguido da comparação com ferramentas consolidadas no mercado. Espera-se obter, assim, uma solução que inclua todos os benefícios do BIM e PLM ao mesmo tempo, de forma eficiente e construtiva.

2.8 Comparação entre BIM e PLM

Diferentemente do BIM, softwares PLM não estão focados na confecção de elementos virtuais de projeto, mas como receptores destes. Um banco de dados de modelos feitos em BIM (que têm a extensão .ifc) pode ser lido por softwares PLM, a fim de proporcionar um gerenciamento do projeto maior. Ou seja, as duas metodologias se complementam. Portanto, em uma atuação conjunta, um servidor BIM corresponde a uma biblioteca de modelos virtuais, enquanto o PLM funciona como a plataforma do projeto, onde todas as informações são guardadas, acessadas e atualizadas em tempo real.

Pelas aplicações citadas na Seção 2.6, percebe-se que o gerenciamento de projetos na Indústria Mecânica é feito de forma eficiente, através do PLM. Porém, a integração entre os softwares é limitada a parcerias específicas, como Solidworks/Teamcenter e o Catia/Enovia.

O PLM é uma designação que envolve todo e qualquer tipo de interação entre o ciclo de vida do produto e os agentes responsáveis pelo projeto, onde cada desenvolvedor cria uma metodologia de gerenciamento própria, muitas vezes, em parceria com empresas específicas. Isso levanta a questão da limitação da interoperabilidade entre empresas diferentes que devem trabalhar juntas em um mesmo projeto.

Por exemplo, uma empresa de engenharia cujo foco é projeto de bombas hidráulicas, não costuma utilizar o mesmo método de gerenciamento de projeto da empresa responsável pela construção de barragens e usinas hidrelétricas. Tal situação é capaz de gerar um contratempo na comunicação entre os dois agentes, resultando em maiores gastos em um trabalho em conjunto.

O BIM, por outro lado, consegue fazer essa integração através da intercomunicação entre os softwares, como citado anteriormente. A Engenharia Civil, mais avançada no emprego do BIM em seus projetos, pode ser amplamente beneficiada pela adoção deste pela Engenharia Mecânica. Um equipamento mecânico desenvolvido em BIM, ao ser incluído no projeto de uma construtora, terá todas suas características lidas corretamente. Podem haver, além

das dimensões precisas do equipamento, sensores de operação e indicativos de mau funcionamento, cuja linguagem será compatível com o banco de dados da empresa. Portanto, percebe-se que o PLM está contido no BIM, ou seja, existem níveis de aplicação do BIM que não são abarcados pelo PLM.

2.9 O BIM na Indústria Aeronáutica

Os projetos envolvendo o BIM e a Indústria Aeronáutica pelo mundo estão relacionados a obras de infraestrutura, como aeroportos e instalações auxiliares, não se estendendo à produção das aeronaves. Dentre os trabalhos nesta linha, a expansão do Aeroporto Internacional de Chennai, na Índia, é um exemplo proeminente. Este projeto (Figura 2.5) ganhou o prêmio *Tekla BIM Awards 2010*, na categoria melhor projeto em aço, ao proporcionar uma redução de 4% no desperdício de materiais em relação aos outros terminais construídos de forma convencional. (Kumar and Mukherjee, 2009)

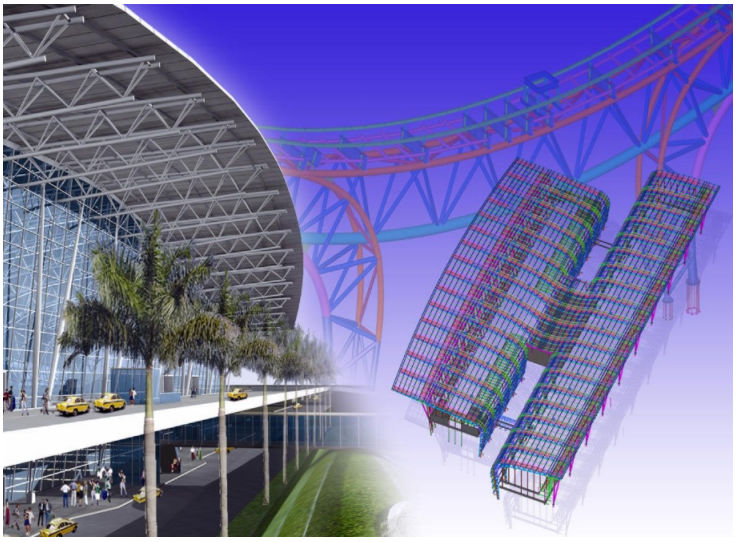


Figura 2.5: Renderização e esquema da estrutura utilizada para a construção do terminal do Aeroporto Internacional de Chennai, Índia. (Young Chae Park, 2020)

O Brasil, por sua vez, também apresenta projetos relevantes para adoção do BIM na aviação. A Comissão de Implantação do Sistema de Controle do Espaço Aéreo (CISCEA) apresentou pela primeira vez, em 2018, no Rio de Janeiro, um *workshop* sobre objetivos, metas e estratégias adotadas para a implantação do BIM em seus trabalhos, em especial no Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). A organização é uma divisão da Força Aérea Brasileira, que se associou ao do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) do Paraná para capacitar o Grupo de Trabalho da CISCEA. (Fábio Maciel, 2018)

Em 2019, a CISCEA realizou o segundo encontro, também no Rio de Janeiro, para demonstrar a evolução da aplicações do BIM. Os primeiros projetos de reforma em renderiza-

ção 3D foram feitos, baseados no software Revit, da Autodesk e outra tecnologia foi apresentada, chamada de *Digital Twin*, que consiste na virtualização de um produto real dentro do mundo digital. (Denise Fontes, 2019)

2.10 A Realidade Estendida (RE) aplicada ao BIM - Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA)

O conceito de Realidade Estendida foi concebido há quase dois séculos atrás, em 1838, pelo cientista Charles Wheatstone, ao inventar as primeiras versões dos estereoscópios, dispositivo que combina duas imagens (de cada olho) para a formar uma única, cirando o senso de profundidade (3D). Esse mecanismo é usado até os dias de hoje, nos mais modernos equipamentos de realidade virtual encontrados no mercado. (Bernard Marr, 2021)

A tecnologia evoluiu para uso militar, em pilotos de helicóptero e caças de guerra e, também, para entretenimento, com a finalidade de transportar o usuário a uma realidade semi ou totalmente alternativa. A Realidade Virtual consiste na migração total do espaço para um ambiente virtual, através de um dispositivo vestível de cabeça, que é capaz de monitorar o movimento do usuário no ambiente. A Realidade Aumentada, por sua vez, mistura o ambiente real com elementos virtuais, mostrados na interface de um dispositivo (de cabeça ou portátil), com a finalidade de melhorar a visualização, mas sem desconectar os dois ambientes - real e virtual.

Até o início do século XXI, entretanto, o uso de tais ferramentas foi bastante restrito e não houve novas pesquisas para aprimorar a tecnologia. Foi apenas em 2014, com a criação do *Oculus Rift* por Palmer Luckey, de 18 anos, que as possibilidades das aplicações foram finalmente enxergadas. O Facebook, então, adquiriu a patente por 2 bilhões de dólares, frente a um investimento inicial de apenas 2,4 milhões. (Instituto de Engenharia, 2015)

Após esse episódio, grandes empresas como Samsung, Sony e Google desenvolveram suas próprias versões do *Oculus Rift*, trazendo aos olhos dos consumidores os dispositivos de Realidade Virtual, com foco em entretenimento e aumento da produtividade da vida cotidiana. É importante citar que outras empresas, como a Microsoft, investiram em dispositivos ou softwares de RV e RA focados para o uso industrial e corporativo, algo que também começou a ser explorado.

Tais acontecimentos, assim como a popularização dos dispositivos portáteis (smartphones e tablets), fizeram com que quase qualquer pessoa conseguisse acesso a um software de RV ou RA. Isso reduziu bastante o custo da tecnologia e aumentou a qualidade exponencialmente, possibilitando seu uso em diversas áreas: jogos eletrônicos, processos de manufatura, educação, saúde, construção civil e até no setor policial.

Em 2017, um estudo feito pela empresa de consultoria americana Gartner disse que o desenvolvimento completo das tecnologias de RV pode levar, em média, de 2 a 5 anos,

enquanto o de RA pode levar de 5 a 10 anos (Gartner, 2017). Portanto, é uma tecnologia emergente, mas que gera muitos frutos no nível atual de evolução.

2.10.1 Aplicações de RV e RA na Engenharia Civil e Mecânica

A popularização dos softwares que empregam tais tecnologias permitiu que praticamente todo o ciclo de vendas dos produtos de engenharia fosse otimizado, caso a empresa opte por investir na infraestrutura necessária.

- Design de Projetos: uso de RV para interagir com os elementos, em uma renderização virtual do espaço, a fim de visualizar as etapas de desenvolvimento e como os objetos interagem entre si. A RA pode ser útil na visualização de elementos e objetos acoplados ao modelo real, em uma realidade misturada (*mixed reality*), mostrando como um teste de adequação ao projeto;

- Experiência do cliente: nesta etapa, é possível apresentar o projeto ao cliente, através de um *tour* virtual, sem fazer o uso de plantas ou catálogos, que normalmente têm linguagem técnica e de difícil visualização. Dessa forma, tempo e recursos são otimizados, enxugando gastos e reduzindo retrabalhos relacionados às exigências do cliente.

- Treinamentos: possibilidade de realizar treinamentos sem a infraestrutura completa, utilizando renderizações virtuais dos ambientes ou máquinas. Dessa forma, vários cenários podem ser testados para preparar a equipe técnica. Esse processo é muito utilizado na Fórmula 1 e Aviação, para testes e cursos de pilotagem.

- Manutenção: identificação dos componentes por uma câmera, com os dados técnicos e passo a passo para a resolução de problemas, diretamente na tela do dispositivo (smartphone ou óculos de RV). Muito usado em manutenção de elevadores e no automobilismo.

As tecnologias descritas até aqui servem para visualização e interação com os elementos já postos dentro do ambiente de simulação. Portanto, resta entender como acoplá-los à cena, seja através da RA ou RV. A origem dos objetos pode ser através de modelagem em software de CAD convencional, ou através da renderização resultante de duas técnicas: conjunto de imagens ou pontos - fotogrametria e *laser-scanning*, respectivamente.

No primeiro caso, o objeto foi modelado desde o início, a partir de um software de CAD, seguindo os requisitos do projeto atual ou adquirido de um repositório BIM. No segundo caso, o objeto ou construção já existe, o que leva à tarefa de digitalização e não de modelagem total. Atualmente, existem duas técnicas principais para se obter o elemento digitalizado: fotogrametria e *laser-scanning*, processos explicados na descrição abaixo:

- Fotogrametria: é um processo de digitalização de objetos/cenários por meio da concatenação de centenas de imagens, que se complementam na formação do objeto virtual final. É um meio barato de digitalização, possível de ser feito até pela câmera do celular, o que o torna bastante acessível. A precisão é na ordem de centímetros e pode ser feita, também, por drones. Um exemplo de aplicação desse processo é o *Google Street View* e a Draco Volans utilizou essa técnica na representação virtual da estrutura em carbono do trem de pouso principal, como visto na Figura 2.6. Após registrsadas as imagens, um software deve ser usado para compilá-las, como o Blender ou Solidworks;

- *Laser-scanning*: é uma técnica que dispara milhões de feixes de laser por segundo, resultando em uma nuvem de pontos provenientes da interseção dos feixes com o objeto. É muito utilizada para grandes espaços e estruturas e, diferentemente da fotogrametria, tem precisão de milímetros, já entregando o objeto renderizado e exportado para o computador no qual o dispositivo está conectado. Também podem ser feitas mais de uma medição, melhorando ainda mais a precisão. Um exemplo de construção de utilizou esse método para levantamento de dados para reforma é o Centro de Hematologia e Hemoterapia de Santa Catarina - HEMOSC. Outro exemplo interessante ocorre em algumas mineradoras no Japão, onde o *laser-scanning* é feito por drones associados às escavadeiras, constantemente alimentando-as sobre a evolução da mineração. Isso dispensa o emprego de pessoas no processo.

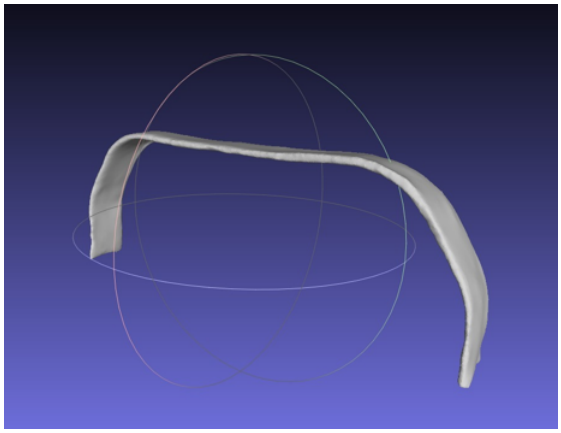


Figura 2.6: Fotogrametria da estrutura do trem de pouso principal do projeto de Aerodesign de 2019, da equipe Draco Volans - feita com imagens da câmera do celular, depois renderizado no software Blender.

Sintetizando as vantagens de uma técnica de aquisição de dados em relação à outra, tem-se que a fotogrametria possibilita a digitalização de objeto por um custo relativamente baixo, onde o requisito mínimo é ter acesso a um smartphone com os aplicativos necessários que, por vezes, são gratuitos. Esse método é ideal para pequenos espaços ou objetos, que não exigem um alto nível de detalhamento na representação. Porém, mesmo sendo mais custoso, o emprego de um dispositivo de *laser-scanning* tem precisão muito maior e capacidade de

digitalizar espaços e estruturas muito maiores, como pontes ou torres. É possível, inclusive, fazer o levantamento periódico dos dados, posicionando o aparato na exata posição inicial, para acompanhar deformações ou evolução da obra. A adoção de um método ou outro será definida pelo orçamento disponível da empresa, assim como a adequação ao tipo de trabalho a ser digitalizado.

Após concluída essa etapa de aquisição de dados, seja por elementos pré-existente ou gerados por modelagem, resta incluí-los ao repositório BIM utilizado no projeto e, com esses dados em mãos, é possível continuar para como a indústria emprega o conceito de Realidade Estendida.

- Aplicativo *WakinApp*: que permite que os usuários do *Autodesk Revit* e do *Fusion 360* transformem seus projetos 3D em realidade aumentada e realidade virtual, através de um smartphone ou tablet. Outros aplicativos/programas são: *Augment*, *Unrealengine*, *Fuzor*, *Enscape*, *Shapespark*, utilizados não somente em ambientes industriais, mas também para desenvolvimento de jogos eletrônicos, por exemplo;

- *DAQRI Smart Helmet*: é um capacete com visor integrado que permite visualizações de projetos e modelos 3D em realidade aumentada. Assim, durante a obra pode-se comparar o projeto original com o trabalho em andamento, em uma interface que trabalha em *layers* (como em um software de CAD), que podem ser ocultadas para restringir a análise de campo a um sistema específico. O *Smart Helmet* trabalha em associação com os softwares *Mortenson Construction* e *Autodesk Revit*. (VIA - UFSC, 2019);

- *Microsoft Hololens 2*: semelhante ao DAQRI Smart Helmet, trabalha em conjunto com empresas de softwares para fornecer o mesmo suporte, como *Trimble, AECOM, Tekla e Procore*;

- Aplicativo *GAMMA AR*: utiliza a tecnologia de RA para inserir um modelo 3D virtual da construção e compará-lo com o real;

- "Construtech"brasileira Safelive: oferece treinamentos imersivos e inovadores para a área de segurança de trabalho no setor da construção civil;

- O Instituto Senai de Tecnologia em Construção Civil, em parceria com a Benazzi Engenharia, montou um manual para evitar acidentes de trabalho, utilizando a modelagem BIM junto à Realidade Aumentada, para possibilitar a identificação dos locais de riscos de queda, rota de pessoas e de máquinas;

Por fim, é interessante citar que a Confederação Nacional da Indústria (CNI), em 2020, começou um estudo comparando resultados de empresas que passaram a utilizar tecnologias como RV e RA. Como resultado, o estudo mostrou que 54% registraram um lucro maior ou igual ao período pré-pandemia. Além desse dado importante, percebeu-se, no estudo, que os preços dos dispositivos para desenvolvedores e consumidores vêm diminuindo, o que mostra um amadurecimento do mercado e popularização dos meios.

Capítulo 3

O Projeto de Aeronaves e o Aerodesign

Neste capítulo, será dado um panorama sobre o projeto de aeronaves, para contextualização e para dar base às considerações desenvolvidas posteriormente no texto. O projeto de aeronaves embasa os procedimentos de projeto do Aerodesign, ao mesmo tempo que a competição contribui com a formação de estudantes que têm foco no projeto de aeronaves.

Uma aeronave é composta por diferentes conjuntos de componentes, cada qual ligado a uma área de projeto. O principal objetivo de um avião é ser capaz de desempenhar a missão requerida e o princípio é o mesmo para todos, mas o processo construtivo muda completamente. Um avião agrícola, por exemplo, precisa ser pequeno, ágil e de fácil operação para alijar sementes, água e/ou substâncias químicas. Por outro lado, um avião a jato precisa ter sua estrutura adaptada para voos supersônicos e ter uma manobrabilidade eficiente a altas velocidades.

Na competição de Aerodesign é exigida uma missão de voo e exigências de projeto às equipes competidoras, que devem desenvolver o projeto para atender esses requisitos. Assim, o uso de uma estratégia de gerenciamento pode ser útil para melhorar o desempenho da equipe de modo a subsidiar a avaliação da introdução do BIM no projeto de Aerodesign. Portanto, é apresentada, na próxima seção, a evolução e as etapas do projeto de aeronaves seguidas pelo detalhamento do gerenciamento do projeto de Aerodesign e os problemas encontrados em seu desenvolvimento.

3.1 A evolução do projeto aeronáutico

O primeiro vôo comercial oficial ocorreu momentos antes da Primeira Guera Mundial, em 1913. A aeronave Sikorsky Ilya Muromets, representada na Figura 3.1), desenvolvida no antigo Império Russo, podia transportar 16 passageiros e voava a uma velocidade de 110 km/h. Posteriormente, com a eclosão da Guerra, foi transformado em um bombardeiro, podendo carregar até 800 kg em bombas (Thiago Vinholes, a, 2017).

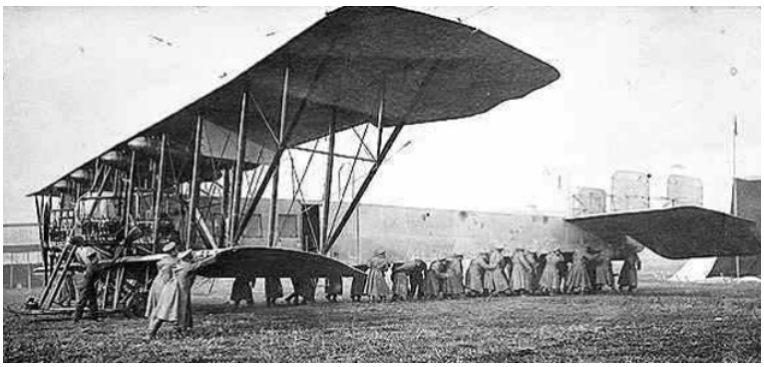


Figura 3.1: Sikorsky Ilya Muromets, Rússia. (Canal Piloto Bianch, 2014)

Em 1919, o monoplano Junkers F13, alemão, foi o primeiro construído inteiramente de metal, o que aumentou drasticamente sua durabilidade e abriu caminho para a aviação comercial entre países (Figura 3.2 (a)). Houve registro de vôos em território brasileiro, sob gestão da então operadora Varig. Poucos anos depois, em 1934, a Boeing, com o Boeing 247 (Figura 3.2 (b)), deu início à aviação comercial moderna, com a introdução de um trem de pouso retrátil, fuselagem e asas de alumínio. A aeronave contava com um sistema de piloto automático que estabilizava a altitude de voo e também fez voos no Brasil.

(a) Fonte: google.

(b) Boeing 247, Norte-americano. Fonte: google.

Figura 3.2: (a) Junkers F13, Alemão; (b) Boeing 247, Norte-americano.(Blog Airway, 2017)

Após isso, melhorias tecnológicas foram sendo feitas, como a pressurização de cabine, com o Boeing 307 Stratoliner (Figura 3.3 (a)), desenvolvimento de motores a jato, com o inglês De Havilland Comet (Figura 3.3 (b)), vôos supersônicos, com o franco-britânico

Concorde e, mais recentemente, a substituição de controles mecânicos de voo, para controles elétricos, em um conjunto chamado de *fly-by-wire* (Figura3.3 (c)). (Thiago Vinholes, b, 2017)

(a)

(b)

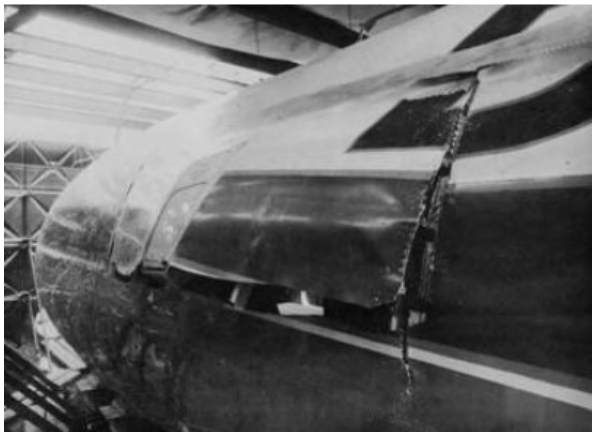
(c)

Figura 3.3: (a) Boeing 307, Norte-americano.; (b) De Havilland Comet, Inglês; (c) Concorde, Franco-britânico. (Blog Airway, 2017)

A história do Havilland Comet, particularmente, é de grande importância a este trabalho, por exemplificar uma situação em que o uso do BIM pode entrar como um fator determinante no sucesso e previsibilidade de um projeto aeronáutico. O Comet foi o primeiro avião a jato para transporte de passageiros do mundo, desenvolvido em 1944, ainda durante a Segunda Guerra Mundial. Teve se primeiro voo em 1952, sendo um sucesso imediato, superando em performance os pares Boieng 377, Douglas DC-6 e o Lockheed Constellation.(Paul Withey, a, 2018)

Porém, a história de sucesso teve fim após sucessivos acidentes, principalmente na corrida de decolagem. Houve, inclusive, dois casos de falhas catastróficas em voos sobre o Mar Mediterrâneo. A principal causa dos acidentes foi fadiga dos metais da estrutura da fuselagem e cabine de comando, como mostra a Figura 3.5. Reparos foram feitos em todas as unidades e a produção foi retomada, mas, a esse ponto, concorrentes como o Boieng 707 e o Douglas DC-8 já supriam a demanda por mais segurança nos aviões. Ao todo, foram projetadas quatro versões do Havilland Comet, de 1944 a 1959, ficando em operação até 1970, no trajeto Cidade do México - Los Angeles. Atualmente, alguns modelos encontram-se restaurados em museus pelo mundo, como a unidade do *Royal Air Force Museum Cosford*, ilustrado na Figura 3.4. (The Museum of Flight, 2018)

Figura 3.4: Comet 1, em exposição em *Royal Air Force Museum Cosford*, Cosford, UK (Tony Hisgett, 2009)



(a)

(b)

Figura 3.5: (a) Falha na estrutura da cabine do Havilland Comet, pelo efeito da fadiga dos materiais da estrutura; (b) Falha ocorrida na região de uma das janelas da aeronave; (Paul Withey, b, 2019)

Apesar das consequências dramáticas que as crises financeiras e as duas grandes guerras mundiais trouxeram, a aviação civil e militar foi extremamente desenvolvida nesses períodos, por uma questão de necessidade, como visto na história do Havilland Comet. Muitas vidas foram perdidas, mas, ao mesmo tempo, muitas foram salvas com a evolução da aviação. Hoje

em dia, a preocupação com a sustentabilidade é um dos principais pilares, onde a economia de combustível e menores emissões de gases poluentes estão no topo da lista de prioridades das empresas.(Diogo de Oliveira, 2017)

Agora, quanto ao projeto aeronáutico propriamente dito, todo o seu desenvolvimento era à base de papel e lápis, até o surgimento do Software CATIA, em 1977, pela Dassault Systèmes. Esse programa foi capaz de traduzir fórmulas geométricas em código de computador, possibilitando a confecção de modelos tridimensionais das aeronaves, sendo utilizado até hoje, em larga escala. Alguns outros também são utilizados de forma profissional, como o Pro Engineer, da Norte-americana PTC e o SolidWorks, também da Dassault Systèmes. (Luiz Gustavo de Oliveira, 2018)

3.2 Etapas do Projeto Aeronáutico

Inicialmente, um projeto aeronáutico tem o objetivo de concluir uma missão específica, o que ditará quais as características que a aeronave deverá possuir. Logo, todos os componentes deverão ser projetados e escolhidos com base na demanda correspondente (Raymer, 1992).

Após essa etapa, vem o projeto preliminar, onde cada área de projeto analisará a porção correspondente da aeronave, a fim de iniciar a modelagem do avião em softwares de CAD. Uma maquete pode ser construída, preparando a equipe para avançar para a fase final de detalhamento, em larga escala. O principal resultado obtido é a certeza da construibilidade da aeronave em tempo hábil, de acordo com a demanda do cliente.

Por fim, como ilustra o fluxograma da Figura 3.6 o projeto detalhado tem a função de integralizar todos os componentes que realmente farão parte do protótipo, da forma mais fidedigna possível. O processo de fabricação das peças será definido nesta etapa, a fim de otimizar a massa total e tornar evitar desperdícios. Os testes, então, são intensificados e simuladores de voo podem ser utilizados por pilotos de teste. Após essa etapa, o protótipo deve estar construído e a produção deve ser iniciada. Um esquema da evolução do projeto como um todo está ilustrado abaixo.

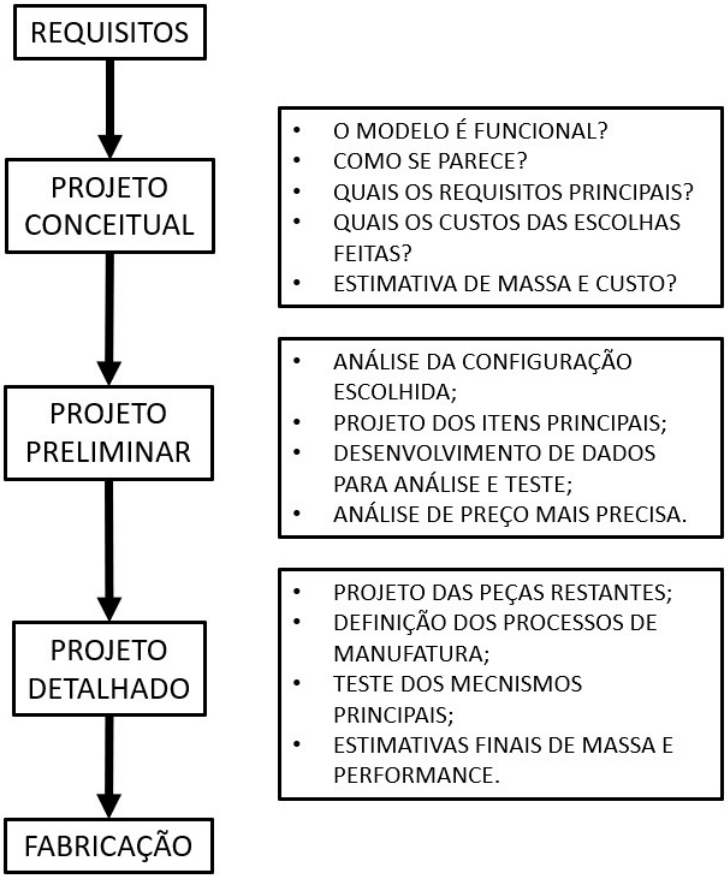


Figura 3.6: Detalhamento da sequência de projeto. (Raymer, 1982)

3.3 Partes de uma aeronave

O projeto de um avião é dividido em várias áreas diferentes, cada qual responsável por desenvolver a geometria e características do produto final. Os componentes serão melhor citados nas próximas seções do texto e a Figura 3.7 indica as principais estruturas encontradas. (Rodrigues, 2011).

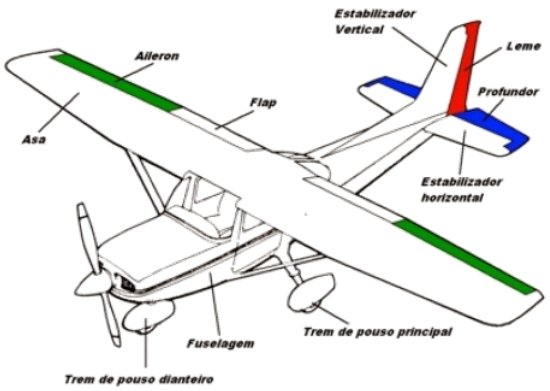


Figura 3.7: Partes constituintes de uma aeronave. (Guia do Aviador, 2014)

3.3.1 Fuselagem

Aqui se encontra toda a carga do avião, seja de passageiros ou mercadoria. Funciona como base para a fixação de todos os outros conjuntos de peças e pode ser feita de três principais formas, como indica a Figura 3.8, a depender das condições de projeto. Por exemplo, uma aeronave que visa o transporte de passageiros, pode ter sua fuselagem do tipo monocoque ou semi-monocoque, mas nunca treliçada, pelos tipos de esforços atuantes (Edison da Rosa, 2006).

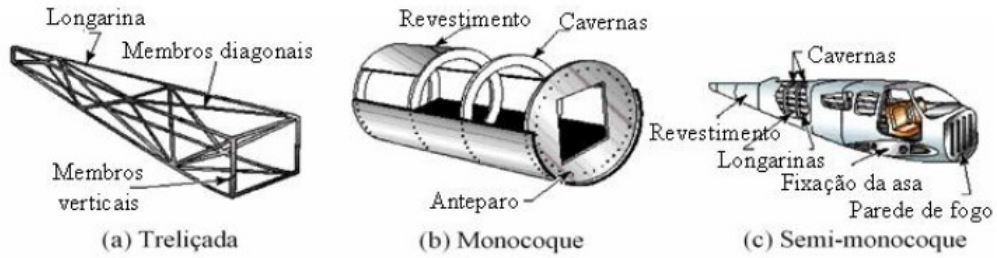


Figura 3.8: As partes que constituem uma aeronave. (Rodrigues, 2011)

3.3.2 Asas

As asas são as superfícies sustentadoras, projetadas também seguindo o envelope de voo. Esse componente impacta fortemente o desempenho, então deve haver uma seleção cuidadosa do modelo que mais esteja apto à missão. Por exemplo, uma asa mais baixa não é muito adequada para aviação agrícola, pois geralmente o pouso é feito em uma pista de terra, que contém detritos que podem causar danos. Além disso, uma asa alta ajuda na manobrabilidade a baixas velocidades. A sequência de fotos da Figura 3.9 mostra algumas aeronaves e suas configurações de asas (Edison da Rosa, 2006).

(a) ATR 72-600, asa alta.

(b) Embraer A-29 Supertucano, asa baixa.

(c) JAS-39 Gripen, asa média.

Figura 3.9: Diferentes configurações de altura da asa em relação ao solo. (Estevam pelo mundo, 2014)

3.3.3 Empenagem

É constituída pelos comandos direcionais do avião - estabilizador horizontal e vertical, localizados na cauda (Figura (3.10). A principal função é prover estabilidade para a aeronave e controlá-la durante o voo. Pode existir ou não, a depender da configuração da aeronave. Por exemplo, o bombardeiro *B2 Spirit*, visto na Figura 3.10 (d), produzido nos Estados Unidos, não possui empenagem (sua configuração é chamada de "asa voadora").

(a) Cirrus Vision, cauda em "V".

(b) C5 Super Galaxy, cauda em "T".

(c) A-10 Warthog, cauda em "U".

(d) *B2 Spirit*, sem empenagem.

Figura 3.10: Exemplos de configurações que variam o formato da empenagem. (Terravista Brasil, 2014)

3.3.4 Trem de Pouso

Com a função de apoiar o avião em solo e permitir o taxiamento no hangar, o trem de pouso pode ter duas configurações diferentes. Pode ser do tipo convencional, onde a cauda do avião fica apoiada em uma bequilha, ou do tipo triciclo, onde a roda frontal fica logo abaixo do nariz do avião. Hoje em dia, o trem de pouso do tipo triciclo é amplamente utilizado em aeronaves comerciais e executivas, enquanto o trem de pouso convencional é restrito aos modelos menores e mais antigos. Pela Figura 3.11 é possível visualizar a diferença entre as duas configurações e o efeito na orientação das aeronaves, extramente importante para o pouso e a decolagem.

(a) Vans RV10, trem de pouco em triciclo.

(b) Paulistinha CAP-4, trem de pouco convencional.

Figura 3.11: Exemplos de configurações que variam o formato da empenagem. (Terravista Brasil, 2014)

3.3.5 Grupo Moto-propulsor

Esse conjunto é formado pelo motor (turbina) e uma eventual hélice, caso seja aplicável ao modelo de aeronave, como no Cessna 152 (Figura 3.12). Sua função primária é fornecer a potência necessária para impulsionar as pás (ou hélice) para que gerem a força de tração que movimentam o avião. Este pode ser monomotor, bimotor, ou multimotores, seguindo as especificações de projeto, devendo dispor de uma forte estrutura para suportar os esforços e vibrações.

Figura 3.12: Componentes internos de um Motor Continental, Cessna 152. (Aeropole, 2014)

3.4 Projeto Conceitual de uma Aeronave

No projeto conceitual, perguntas sobre o arranjo da configuração inicial, tamanho, peso e performance devem ser respondidas. Aqui, os requisitos são constantemente revisitados para garantir que é possível a construção de uma aeronave que apresente o menor custo possível. Vários problemas surgem nesta etapa e são solucionados através de novas ideias e mudanças no projeto, até que se atinja uma aeronave razoavelmente eficiente, com a configuração definida (Raymer, 1992). As etapas do projeto conceitual podem ser identificadas no fluxograma da Figura 3.13, sendo um processo constante de aprimoramento e iterações.

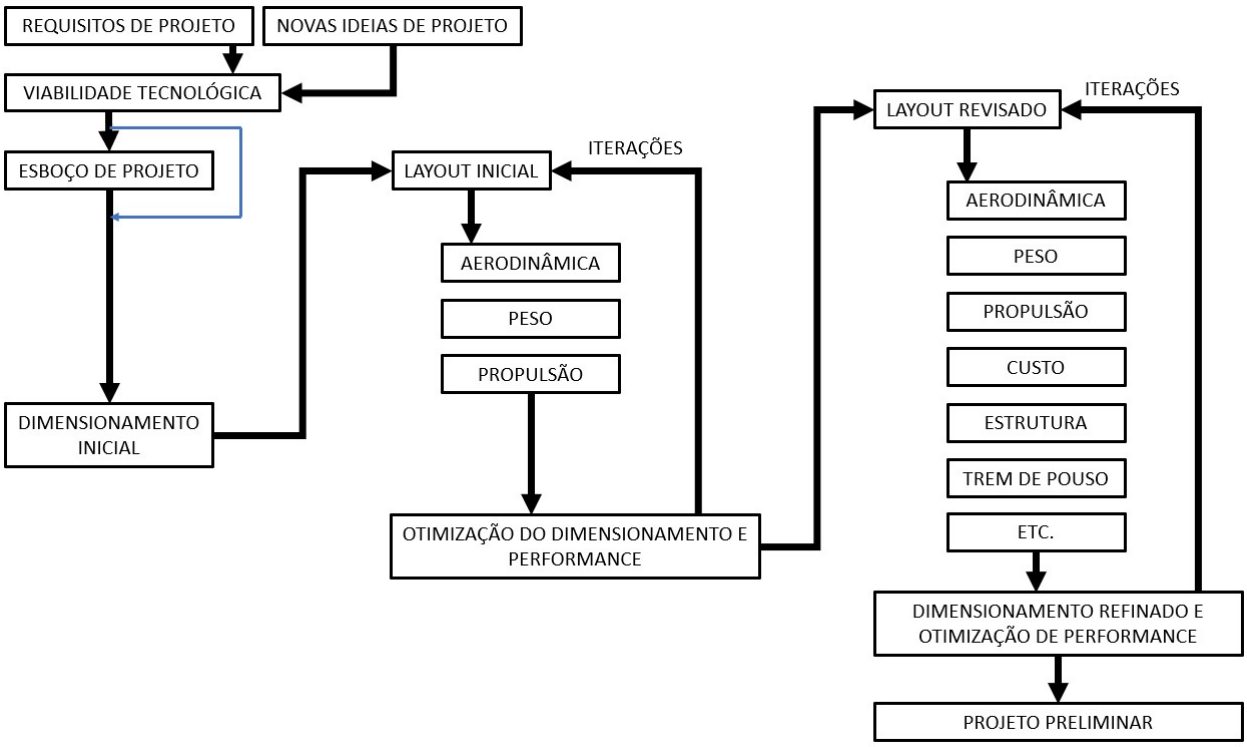


Figura 3.13: Etapas do projeto conceitual de uma aeronave. (Raymer, 1982)

A título de exemplo, um esboço como o representado na Figura 3.14 deve ser o ponto de partida para o projeto conceitual. A partir dele será estimado o formato aerodinâmico, consumo de combustível, trem de pouso, peso e performance, em comparação com aeronaves semelhantes já existentes.

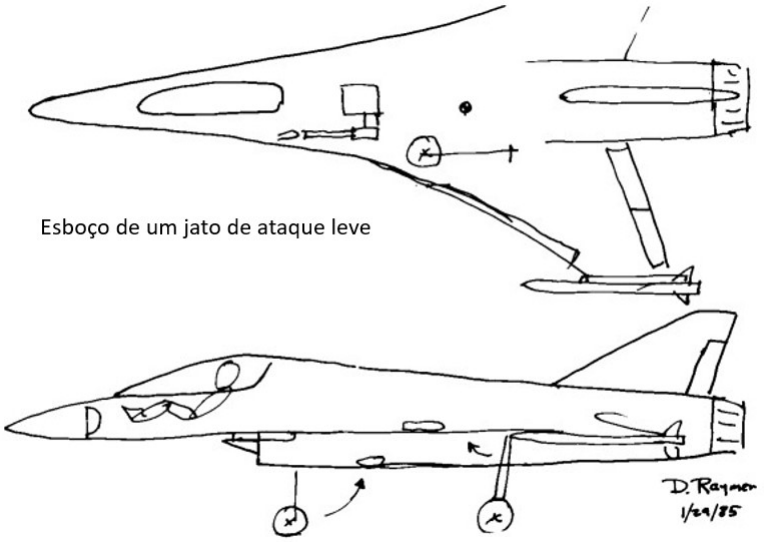


Figura 3.14: Esboço inicial da fase de projeto conceitual. Traduzido de (Raymer, 1982)

Ao final desta etapa, a equipe deve ter, em mãos, a seguinte relação de documentos:

- Desenhos Esquemáticos e Preliminares;
- Renderizações tridimensionais do modelo;
- Modelos ou maquetes;
- Desenhos técnicos preliminares;
- Fotos, layout e arte final;
- Banco de dados com nomes, ideias e produtos.

3.4.1 Missão de voo

A missão de voo é uma das primeiras observações de projeto, pois é a partir dela que as condições de decolagem, voo e pouso serão definidas. Uma aeronave comercial de transporte de passageiros, por exemplo, tem a missão dividida em taxiamento, decolagem, subida, voo de cruzeiro, descida e aterrissagem, finalizando no taxiamento, seguindo o modelo esquemático da Figura 3.15. Um avião de bombardeio, por outro lado, além dessas etapas, também precisa reduzir altitude, alijar a carga e retomar altitude novamente.

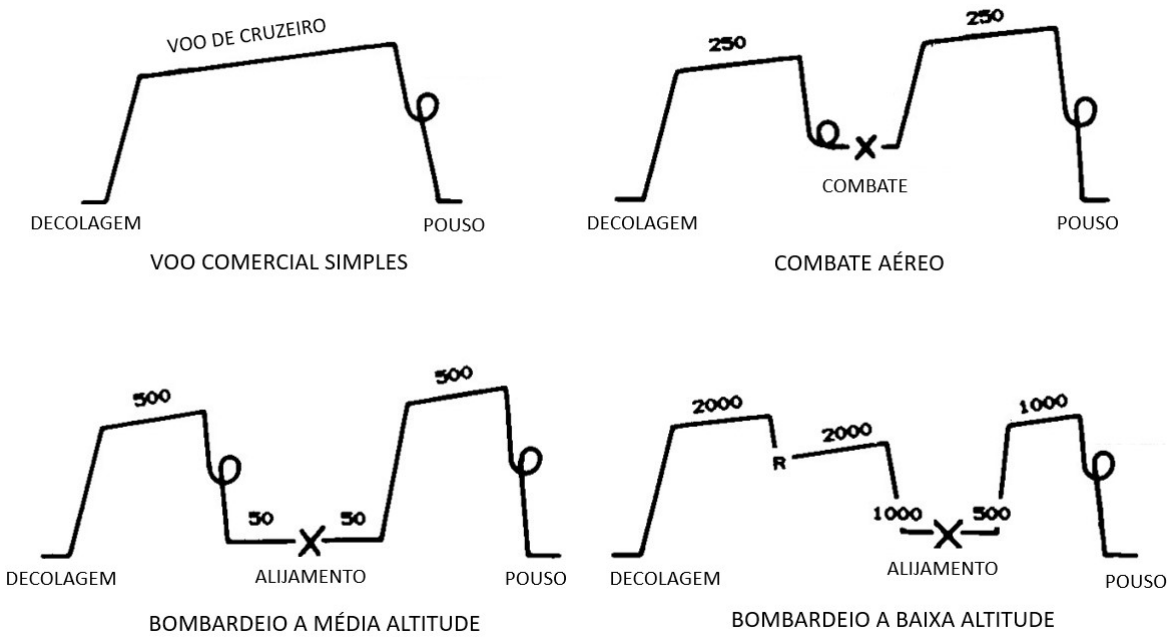


Figura 3.15: Exemplos de missões de voo. Traduzido de (Raymer, 1982)

Um projeto aeronáutico é composto por diversas etapas que devem ser coordenadas entre si, para que o projeto não sofra nenhum tipo de gargalo e atrase o cronograma de entrega. Por isso, a estrutura de otimização inicial deve ser feita seguindo o diagrama da Figura 3.16, segundo (Raymer, 1992)):

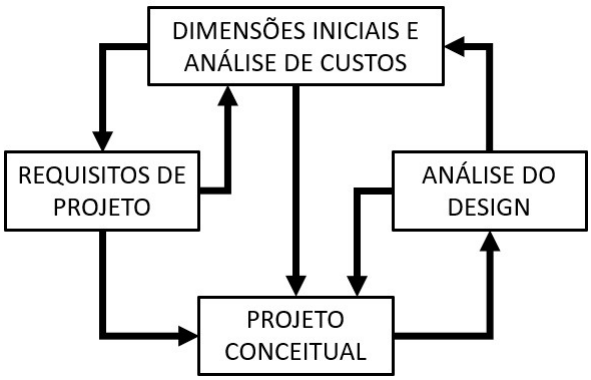


Figura 3.16: Procedimento iterativo até o produto final. (Raymer, 1982)

3.4.2 Projeto Aerodinâmico

Tendo em mãos o esboço inicial e qual será a missão de voo, as condições de voo que a aeronave deverá seguir serão definidas, estando intimamente relacionadas à aerodinâmica. Um avião agrícola, por exemplo, deve ser capaz de voar a baixas velocidades e ter uma alta manobrabilidade. Isso só é possível com uma aerodinâmica que faça sentido para essa situação e, somente depois de definidos os parâmetros, é que as outras áreas moldarão suas

soluções.

Os estudos que fazem parte dessa etapa envolvem a total especificação do perfil ou dos perfis aerodinâmicos que serão usados na asa (Figura 3.17), assim como simulações computacionais e em túnel de vento e cálculo do alongamento e afilamento (Figura 3.18). O peso máximo de decolagem (MTOW - Maximum Take-off Weight) e o consumo de combustível são dois fatores levados em consideração nesta etapa, pois está diretamente correlacionado com a geometria do avião.

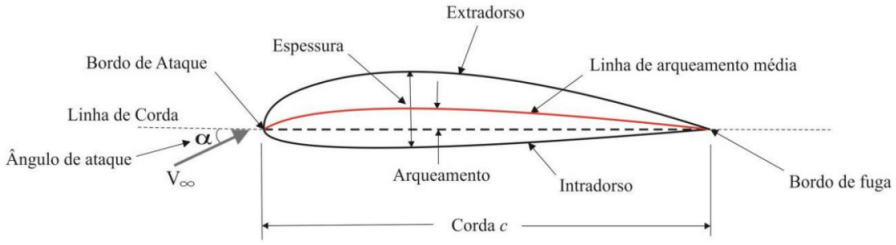


Figura 3.17: Exemplo de perfil aerodinâmico e suas principais características. (DONINI, 2014)

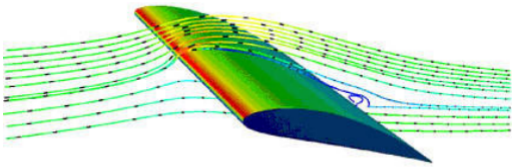


Figura 3.18: Simulação de escoamento sobre a asa, adicionando um ângulo de incidência. (NASCIDOS PARA VOAR, 2016)

3.4.3 Projeto do Grupo moto-propulsor

Nesta etapa, após as condições de voo estarem praticamente todas definidas, a configuração do motor deve ser a mais eficiente, além de concordar com o formato do avião e seguir o projeto aerodinâmico. A disposição pode ser do tipo "tractor- motor na frente da asa, ou "pusher- motor atrás da asa. A seleção do motor levará em conta o peso da aeronave, a magnitude da força necessária para movimentar o avião e as condições de voo. Também é importante levar em consideração o comprimento de pista disponível para decolagem e pouso e as intempéries que serão encontradas durante o voo de cruzeiro.

Caso o método de propulsão seja através de uma hélice, esta também deve ser projetada para garantir a eficiência do conjunto, evitando, assim, consumo desnecessário de combustível.

3.4.4 Projeto de Desempenho

Essa etapa consiste na reunião dos parâmetros encontrados nos projetos aerodinâmico e propulsor para que a comunicação entre eles esteja fluida, da forma mais eficiente possível. Aqui os resultados estão na forma de curvas de tração para cada combinação de motor e hélice, eficiência da decolagem, manobras e pouso e relação entre carga útil e altitude.

O avião, após uma análise minuciosa de desempenho, precisa ser capaz de voar de forma estável, reta e nivelada a velocidade de cruzeiro, se mantendo em seu envelope de voo durante toda a missão. Caso isso ocorra, é fato que o consumo de combustível está bem regulado com a potência fornecida pelo motor e as forças atuantes na aeronave estão balanceadas. Também são esperadas estimativas para o comprimento de pista necessário para pouso e decolagem, raio de curvatura e ângulo de inclinação máximos para uma curva e tempo estimado para a conclusão da missão.

3.4.5 Projeto de Estabilidade

Estabilidade é a tendência da aeronave retornar à sua posição de equilíbrio após sofrida uma perturbação. Em um avião de passageiros, é obrigatório garantir o conforto e estabilidade do voo, para que não ocorram movimentações excessivas do avião. Os parâmetros obtidos aqui dizem respeito ao ângulo de ataque, incidência, "trimagem"dos controles.

Esta etapa é bastante complexa, pois envolve equações algébricas de difícil solução, que necessitam de auxílio computacional para serem resolvidas. Porém, desta etapa são esperados parâmetros relacionados à posição do centro de gravidade, critérios para garantia de estabilidade longitudinal, direcional e lateral - determinação do ponto neutro, margem estática e ângulo de "trimagem"da aeronave, tudo esquematizado pela Figura 3.19. Aqui, a atuação dos ailerons, leme e profundor são de extrema importância para a decolagem, curvas, voos de cruzeiro, manobras e pouso.

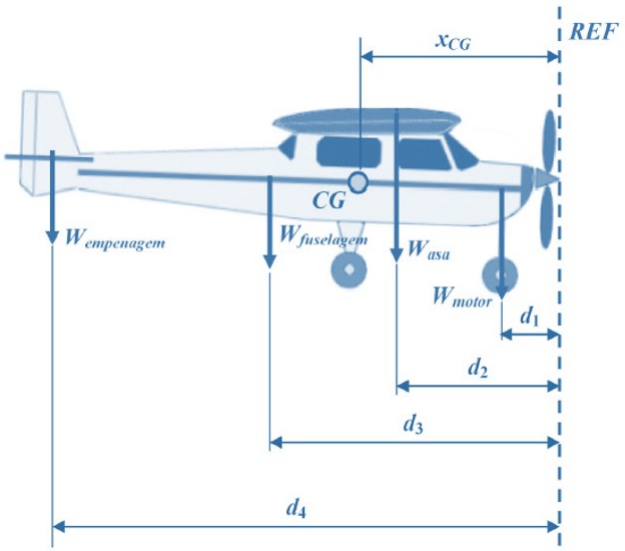


Figura 3.19: Força peso atuantes na aeronave e a respectiva distância do ponto de aplicação à hélice. CG = centro de gravidade. Fonte: (Rodrigues, 2011)

3.4.6 Projeto Estrutural

Após a definição das condições de voo, projetos de aerodinâmica, desempenho e estabilidade, o projetista de estruturas deve usar os dados de cargas atuantes em cada componente para dimensionar a parte estrutural destes. Dados sobre geometria, deslocamento máximo, esforços máximos atuantes e materiais utilizados são alguns dos parâmetros fornecidos por essa área. Aqui, o estilo da fuselagem (treliçada, monocoque ou semi-monocoque) influencia completamente na complexidade do modelo.

Naturalmente, uma aeronave tem o objetivo de carregamento de carga útil, sejam pessoas ou mercadorias. Portanto, a estrutura do avião deve ser a mais leve possível, para que isso seja feito de maneira eficiente, como mostrado na Figura 3.20, onde foi retirado bastante material dos perfis. O parâmetro principal desta etapa, o Fator de Carga, deve estar suficientemente próximo de 1, a fim de não prejudicar a operação ou a integridade da aeronave. Consequentemente, é feita a simulação da estrutura geral, para garantir que todos os componentes operam dentro das condições de contorno (Figura 3.21)

Figura 3.20: Exemplo de processo de otimização estrutural: o formato aerodinâmico da nervura está garantido, mas, internamente, percebe-se que foram feitos alívios de massa, reduzindo o peso das nervuras. (Hangar MMA, 2016)

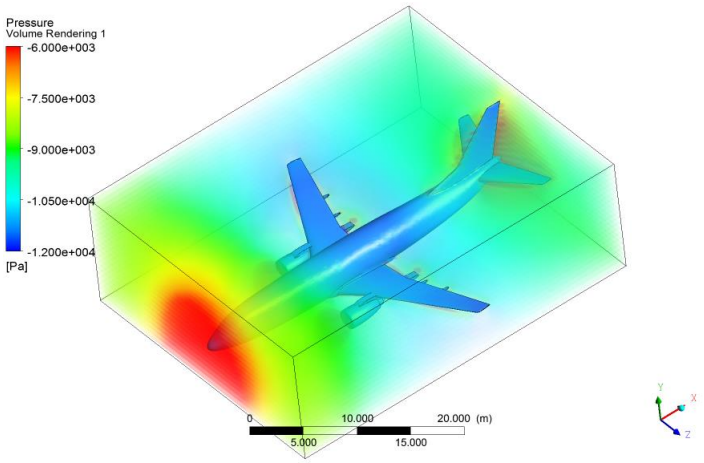


Figura 3.21: Simulação estrutural dos esforços sofridos durante o voo, no programa Ansys. (Matheus Cardoso, 2016)

3.4.7 Análise de Custos

É extremamente difícil predizer o custo de uma aeronave com precisão, pois o processo é, em sua maioria, estatístico, uma vez que a produção da Indústria Aeronáutica não funciona como a de qualquer outro produto. A demanda varia bastante e a vida útil de uma aeronave pode ultrapassar os 15 anos, impossibilitando a comparação com projetos já consolidados no mercado. Aqui, a inflação tem forte atuação, pela grande janela temporal que separa os projetos, assim como a influência de governos e o tipo de cliente envolvido na negociação.

Porém, existem alguns modelos de precificação de aeronaves no mercado, como o RDTE (sigla, em inglês, para Research, Development, Test and Evaluation - Pesquisa, Desenvolvimento, Teste e Avaliação), certificado para a aviação civil. Neste método estão inclusos: pesquisa científica, tecnologia aplicada, prototipagem, testes em solo e avaliação de adequação à indústria. Existe, também, o modelo RAND DAPCA IV, baseado em horas de trabalho (Raymer, 1982). Em adicional aos modelos, também há o custo de combustível, lubrificantes, salários dos operadores, custos de manutenção, seguro e depreciação da aeronave

(Raymer, 1992).

O peso relativo de cada setor da produção está demonstrado na Figura 3.22, onde a operação e manutenção têm maior participação, seguidas pela fabricação propriamente dita.

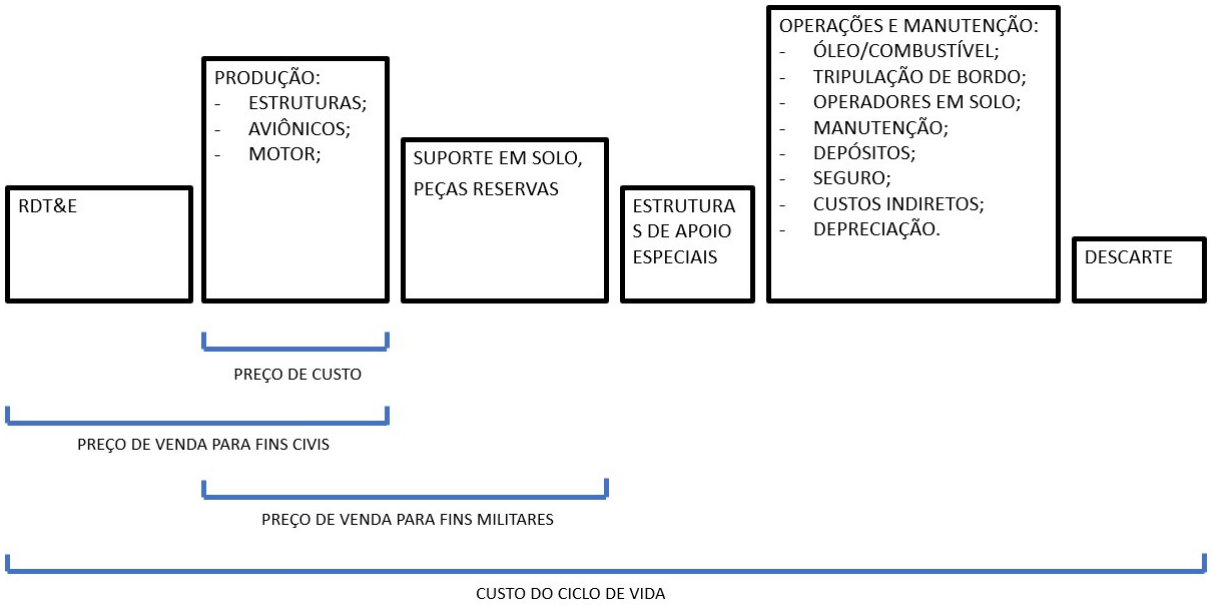


Figura 3.22: Esquema de custos de uma aeronave. A altura dos elementos indica a proporção de custos entre si. (Raymer, 1982)

3.5 O Projeto Aeronáutico e o Aerodesign

O Aerodesign é uma modalidade de competição que surgiu nos Estados Unidos em 1986, concebida e realizada pela SAE International, a qual a SAE Brasil é filiada. Esta também é responsável pelas modalidades Mini Baja e Fórmula SAE. A partir de 1999, a competição aérea é realizada no Brasil, onde participam mais de 50 equipes de universidades brasileiras, além de equipes do México e Venezuela Alguns exemplos são vistos na Figura 3.23.

(a) Equipe Leviatã, ITA, 2016.

(b) Equipe F-Carranca, UNIVASF, 2019.

(c) Equipe EESC-USP, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2019.

Figura 3.23: Exemplos de aeronaves construídas para o projeto de aerodesign.

O objetivo da competição é introduzir o estudante ao mundo da aviação, por meio do desenvolvimento e construção de uma aeronave radiocontrolada para uma missão de voo. Para atingir esse fim, a equipe deve desenvolver exatamente as mesmas etapas de um projeto aeronáutico comercial. Os integrantes devem trabalhar em equipe e construir um modelo que seja capaz de realizar a missão de voo de forma estável e segura, além de estar em concordância com as restrições impostas pelo regulamento da competição. A semelhança com um projeto comercial de larga escala é quase total, o que dá aos alunos uma ótima noção para uma possível atuação na área da aviação, como engenheiros.

A competição é patrocinada pela Embraer e ocorre todos os anos no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, em São José dos Campos, SP. É dividida em duas etapas: competição de projeto, onde a equipe explica tudo o que foi feito durante o ano e apresenta o relatório de projeto, e a competição de voo. Existem, também, três categorias de projeto: classe regular, advanced e micro, cada qual com sua respectiva missão de voo. Todas as modalidades são regidas por um regulamento, que tem função de ditar as regras e boas práticas da competição. Todos os anos, as restrições geométricas para as aeronaves são revisitados, levando as equipes a sempre estarem estudando e otimizando o projeto.

A missão proposta, para a classe regular, consiste na realização de uma volta completa no circuito, incluindo as etapas de decolagem e pouso, seguindo o esquema mostrado na Figura 3.24. A aeronave deve estar intacta após o final da prova, para que o voo seja validado. Além disso, a proposta também inclui o transporte de carga, chamada de "carga paga". Portanto,

a finalidade deve ser projetar a aeronave mais leve possível, que seja capaz de carregar o máximo de carga possível.

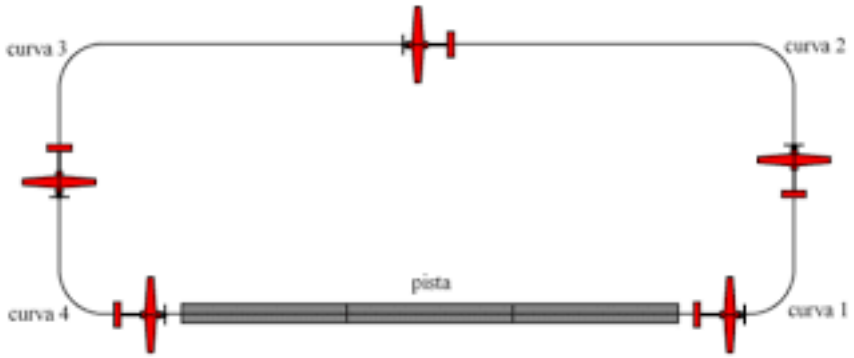


Figura 3.24: Esquema do trajeto de voo a ser concluído na etapa de competição de voo. (Gustavo da Fonseca, 2016)

Durante o curso de graduação da Universidade de Brasília, os alunos de Engenharia Mecânica (entre outros cursos) conseguem colocar todas as etapas citadas nas seções anteriores em prática, ao participar da equipe de competição Draco Volans Aerodesign, competidora da classe regular. Os integrantes da equipe se reúnem periodicamente em uma pista de testes para ensaios e medições de dados de voo, utilizando tanto aviões oficiais como protótipos, como visto na Figura 3.25.

Dois registros também exemplificam o trabalho da equipe durante a competição: na Figura 3.26 (a), o modelo está posicionado para a retirada da "carga paga". Caso a equipe consiga retirar a carga sem danos à aeronave em menos de 60 segundos, há um acréscimo na pontuação final na bateria de voos; na Figura 3.26 (b), foi feito um registro em pleno voo, na curva final do circuito de voo, quando o piloto posiciona a aeronave para pouso.

A Draco Volans é uma equipe que participa da competição SAE Brasil desde 2004 e é composta por 7 áreas de projeto, cada qual com um líder e integrantes dedicados ao tema:

- Estruturas;
- Aerodinâmica;
- Cargas e Aeroeslasticidade;
- Estabilidade e controle;
- Desenho e Manufatura;
- Elétrica;
- Desempenho.

Figura 3.25: Foto da equipe Draco Volans de 2019.

(a)

(b)

Figura 3.26: (a) Aeronave projetada pela equipe, em 2018; (b) Aeronave em voo.

3.6 O Gerenciamento de Projeto no Aerodesign

Atualmente, a área de Desenho e Manufatura da equipe Draco Volans é responsável pela modelagem tridimensional da aeronave e pelo processo de manufatura, acompanhando o projeto desde o início, até a fase de testagem. No início do projeto conceitual, o esboço básico da aeronave é criado, assim como sólidos virtuais para simulações em CFD e cálculos estruturais. A partir daí, o projeto conceitual é divido entre as áreas correspondentes e a aeronave toma sua forma preliminar. Neste ponto, a aeronave está completamente modelada, pronta para o processo de otimização. A Figura 3.27 mostra a renderização do modelo construído no ano de 2019 e a vista isométrica, da Figura 3.28, do trem de pouso e conjunto moto-propulsor, ambos desenvolvidos através do software Solidworks, da Dassault Systèmes.

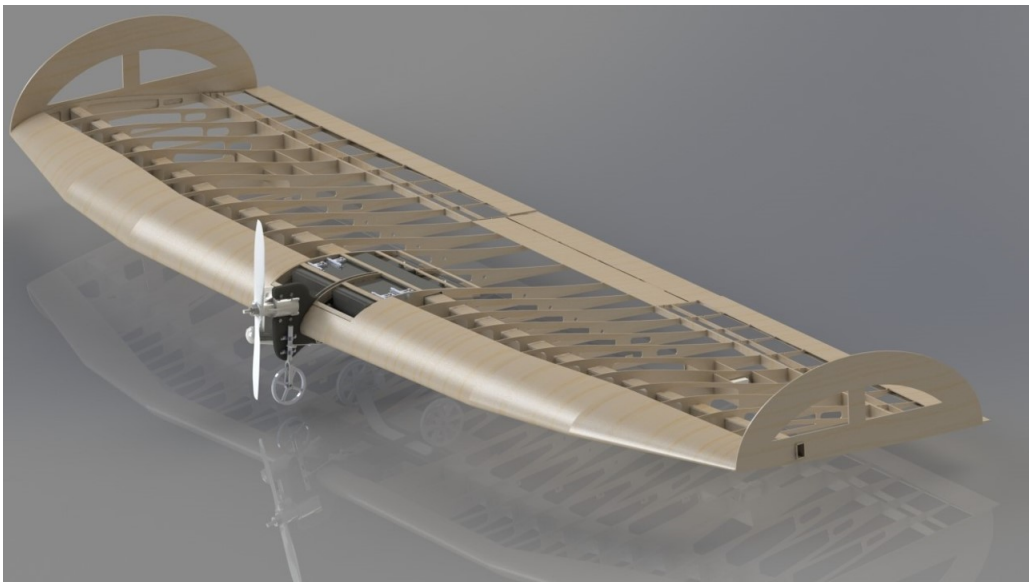


Figura 3.27: Renderização da aeronave construída em 2019.

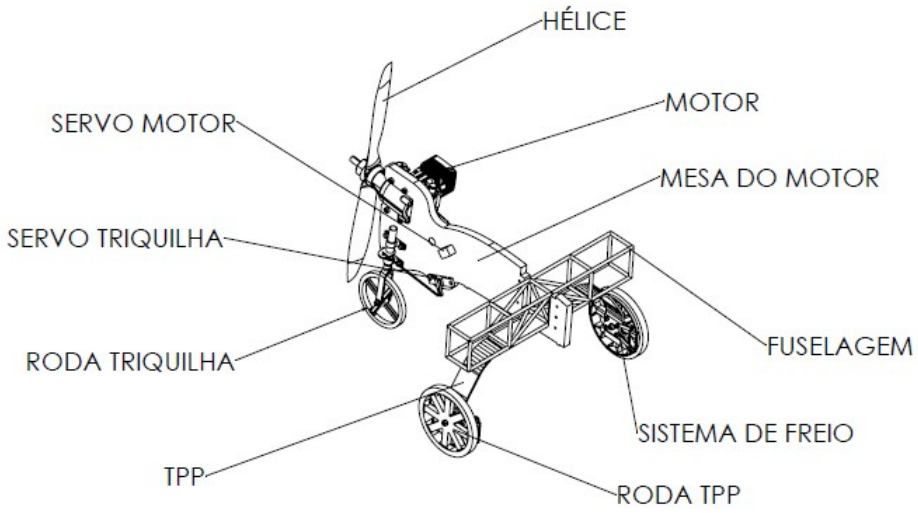


Figura 3.28: Vista isométrica do conjunto moto-propulsor e trem de pouso da aeronave de 2019.

Assim como o modelo virtual, a área de Desenho é capaz de definir os processos de manufatura que serão utilizados na confecção do protótipo. Por exemplo, para o posicionamento correto das nervuras da asa e das superfícies de comando, são usados gabaritos em madeira MDF, como ilustrado na Figura 3.29.

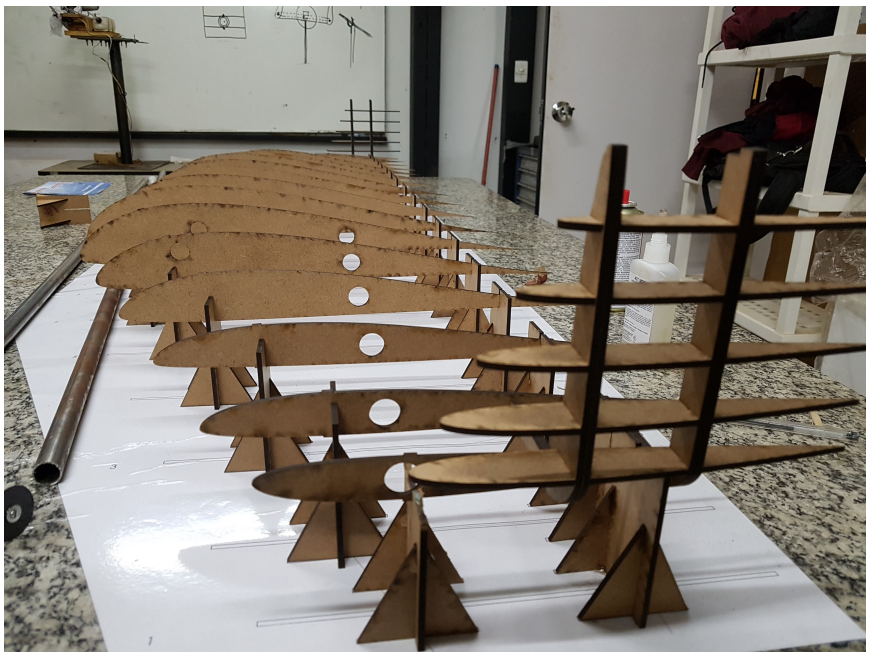


Figura 3.29: Posicionamento das nervuras da asa nos gabaritos, aeronave de 2018.

3.6.1 Alguns problemas encontrados pela equipe

Apesar de funcional, o gerenciamento de projeto da equipe está limitado ao uso do Solidworks para modelagem tridimensional. Não há uma integração efetiva entre as áreas e, muitas vezes, ocorrem incompatibilidades na leitura de arquivos entre os diferentes softwares usados, como o Ansys. Em adição, o processo de otimização geralmente é implementado de forma manual, sob orientação da área responsável pela alteração.

Tais questões resultam em um número considerável de correções e retrabalhos, além de prejudicar a comunicação efetiva entre os membros da equipe. No processo de corte a laser para as nervuras da asa, por exemplo, a diferença dimensional entre o arquivo virtual e o real chegam a prejudicar o encaixe nos gabaritos, algumas vezes, dando início a um intenso trabalho de lixação. Alguns problemas encontrados estão mostrados na Figura 3.30.

(a) Erro no posicionamento do ponto de fixação na superfície de controle vertical (integração Estabilidade/Desenho.

(b) Improvisação no posicionamento do tanque de combustível, com "enforcagatos"(integração Desempenho/Desenho).

(c) Falta de furo para passagem dos fios do servo-motor (integração Elétrica/Desenho)

Figura 3.30: Exemplos de problemas encontrados após a construção do protótipo, resultantes de lacunas na integração entre duas áreas.

Dessa forma, o cronograma de projeto, métodos de manufatura e o gerenciamento de atividades são questões resolvidas em reuniões periódicas com todos os integrantes da equipe, porém sem a adoção um canal único e padronizado de comunicação.

Capítulo 4

Avaliação do uso do BIM no Aerodesign

Neste capítulo, é feita uma avaliação do uso da metodologia BIM no Aerodesign, segundo o fluxo de projeto de manufatura da aeronave. Aqui, o BIM e o PLM são comparados, a fim de estabelecer uma fronteira clara entre as duas metodologias de gerenciamento de projeto e as seções seguintes são responsáveis por descrever como o BIM pode otimizar a interface de comunicação entre as áreas de projeto.

4.1 Fluxo de Projeto da Equipe Draco Volans

Como visto nas Seções 3.5 e 3.6, a equipe Draco Volans é dividida em 7 áreas de projeto: Estruturas, Aerodinâmica, Cargas e Aeroeslasticidade, Estabilidade e Controle, Desenho e Manufatura, Elétrica e Desempenho.

O fluxo de projeto, portanto, envolve sempre duas ou mais áreas, sendo uma delas a de Desenho e Manufatura, responsável por reunir todos os dados para parametrização das medidas e construção da aeronave. No início dos trabalhos, Estruturas e Aerodinâmica são responsáveis por definir, respectivamente, as geometrias da asa, das superfícies de controle (ailerons, leme e profundor), do trem de pouso principal, da fuselagem e da longarina. Em seguida, Desempenho e Elétrica determina a configuração de motor e servos-controle que serão utilizados. Por fim, a área de Desenho e Manufatura reúne todas as informações obtidas para desenvolver o modelo virtual final, propor meios de construção e manufatura para cada componente citado e para o conjunto total.

O trabalho em conjunto com a área de Desenho e Manufatura é executado de forma constante e iterativa, onde a comunicação entre os arquivos deve ser da forma mais fluida possível. Porém, na prática, ocorrem alguns casos de incompatibilidade, o que exige um retrabalho ou uso de outro formato capaz de ser lido por diferentes softwares. Dessa forma, a interface entre as áreas deve ser bem definida e um fluxo de informações contínuo deve ser a prioridade da fase de projeto, pois nenhuma informação pode ser perdida no processo. Alguns exemplos das interfaces entre as áreas estão descritos nas seguintes seções.

4.1.1 Desenho, Aerodinâmica e Estabilidade

Inicialmente, a área de Desenho e Manufatura se comunica com a área de Aerodinâmica, que define os perfis aerodinâmicos e, consequentemente, o formato das asas da aeronave. O resultado desta etapa é um sólido que será utilizado para simulações fluido-dinâmicas em CFD, com o uso do software *Ansys* como visto na Figura 4.1. Esse procedimento também é feito nas fases posteriores de projeto para simular o efeito do fluxo de ar nos demais componentes da aeronave.

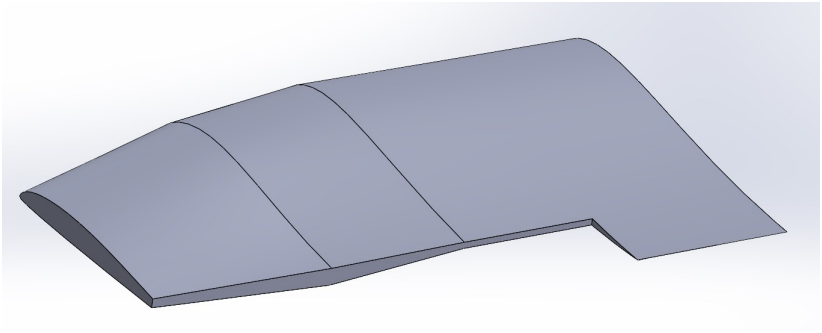


Figura 4.1: Sólido virtual representando o formato final de uma das asas, projeto 2019, equipe Draco Volans.

Por vezes, o uso de arquivos criados em Solidworks pelo Ansys não é totalmente compatível. Muitas vezes, questões como a identificação correta de superfícies extrudadas ou a interseção entre faces do sólido impedem a criação de uma malha para simulação em elementos finitos, por exemplo. Tal empecilho resulta em resultados inconclusivos e leva a um processo de iteração, passando por outras técnicas de modelagem e salvamentos dos arquivos em extensões diferente, até que seja lido corretamente.

A Estabilidade da aeronave, por sua vez, é garantida pelo correto posicionamento do profundor e leme, assim como o ângulo de voo que a asa deve seguir para fornecer a sustentação esperada, chamado de "ângulo de ataque". Portanto, uma solução de posicionamento preciso da cauda da aeronave é imprescindível pra o sucesso do projeto, algo que é tarefa da área de Desenho.

4.1.2 Desenho e Estrutura

Depois de definida a geometria do modelo, é necessário dimensionar as estruturas que irão suportar as cargas de voo, com a condição de que sejam feitas da forma mais leve possível. Dessa forma, um processo iterativo de simulações em elementos finitos é desenvolvido pela área de Estruturas, sempre em conjunto com a área de Desenho e Manufatura. Os mesmo problemas descritos na Seção 4.1.1 ocorrem aqui, o que prejudica o uso eficiente do tempo dedicado às simulações estruturais.

Um elemento que gerou bastante atrito entre os softwares de modelagem e simulação é

o trem de pouso principal. A evolução da equipe através dos anos fez com que este passasse a ser feito com fibra de carbono laminada, um material compósito difícil de ser trabalhado e analisado, pela bibliografia bastante escassa. No modelo construído para a competição de 2019, a equipe Draco Volans utilizou um modelo composto por 15 camadas de manta de carbono (Figura 4.2), laminadas a vácuo, algo inédito para a equipe e importante na redução do peso vazio da aeronave.

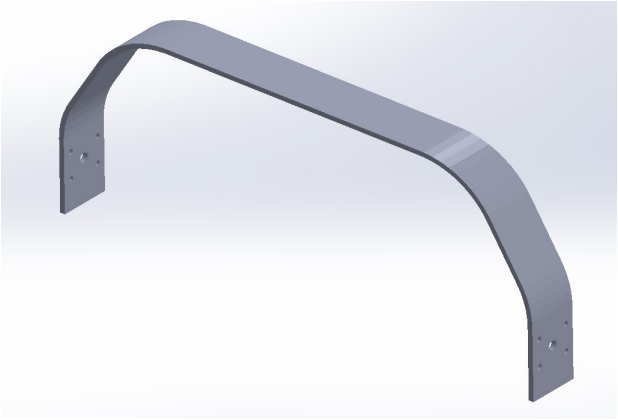


Figura 4.2: Modelo virtual da estrutura do trem de pouso principal, projeto 2019 da equipe Draco Volans.

4.1.3 Desenho, Elétrica e Desempenho

A área de Desempenho é responsável pelo posicionamento e seleção do motor utilizado. Para isso, diversos testes são feitos, principalmente de forças de tração, arrasto, sustentação e peso. Consequentemente, a área de Elétrica precisa definir os servos-controle que serão utilizados para regulagem do fluxo de combustível, assim como o posicionamento da bateria que fornecerá a energia para operá-lo. Não somente do servo-controle do motor, a escolha dos demais também é papel da área de Elétrica, usados nas superfícies de controle - aileron, profundor e leme. Em sintonia, o caminho dos fios através das nervuras será definido junto à área de Desenho, resultando em dados de comprimento dos fios e posicionamento inteligente dos componentes.

4.1.4 Desenho e Manufatura

Por fim, com os parâmetros definidos, um protótipo deve ser construído para voos de teste. Nesta etapa, materiais mais baratos são utilizados, com prioridade para validação da geometria aerodinâmica e conceitos estruturais - neste momento, o fator de segurança de projeto é trabalhado com folga, pois ainda não é um ponto decisivo. Concluída esta etapa, o projeto é otimizado e o avião oficial é manufaturado seguindo as características e definições de projeto. Os componentes que compõem a aeronave e que são manufaturados pela própria equipe são os seguintes:

- Confecção e corte a laser de gabaritos em madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*) (Figura 3.29): nesta etapa, é usado uma máquina CNC (Controle Numérico por Computador) de uma empresa contratada, que utiliza um software próprio para leitura dos arquivos;

- Corte das nervuras da asa e das superfícies de controle, todos em madeira Balsa, seguindo o mesmo processo dos gabaritos;

- Corte da carga que será transportada: feita de chapas de aço-carbono, em geral Aço AISI 1045, que são cortadas e manipuladas na oficina mecânica da Universidade de Brasília;

- Confecção da longarina, trem de pouso principal (traseiro), suporte do motor: componentes feitos em conjunto com a área de Estruturas, com materiais compósitos envolto madeira Balsa, espuma estrutural de baixa densidade (material semelhante ao isopor, porém mais resistente e igualmente leve) e resina Epóxi;

- Rodas e bequilha do trem de pouso dianteiro: feitos de alumínio aeronáutico, usinados em uma oficina mecânica contratada.

4.2 As dimensões do BIM aplicadas ao Aerodesign

Nesta seção, é feita uma discussão quanto à aplicabilidade das dimensões do BIM no projeto de Aerodesign da equipe Draco Volans. Na Subseção 2.2.3, descreveu-se os níveis de competência da metodologia BIM, que permeia desde a modelagem do objeto tridimensional até a possibilidade de padronizar a produção para escala industrial.

Dessa forma, é pertinente o mapeamento de cada uma das dimensões, organizado da seguinte forma: primeiro, uma breve definição da dimensão correspondente, seguida da descrição sobre como a ela é aplicada dentro do projeto atual. Após isso, como pode ser desenvolvida para projetos subsequentes.

4.2.1 3ª dimensão: Renderização Tridimensional

- Como é feito:

A terceira dimensão do BIM versa sobre a modelagem virtual dos elementos e conjuntos de peças, onde as dimensões e formatos são importantes para visualização e planejamento construtivo. Por toda a história da equipe, usou-se o Solidworks como software principal de modelagem. No início, alguns estudos foram feitos para a adoção do Catia, software que é utilizado na Embraer, porém, o Solidworks apresenta uma interface mais intuitiva e autoexplicativa, o que facilita a modelagem, além de ajudar na confecção de peças auxiliares,

como gabaritos para montagem. Outra vantagem é a operação bastante prática do software, algo relevante para a realidade de equipe de competição, onde a rotatividade dos membros exige um aprendizado mais rápido e prático do uso das ferramentas de projeto.

- Pontos a melhorar:

Para esse assunto, o BIM propõe a criação de uma biblioteca de peças, prontas para uso no projeto, onde todas as informações pertinentes estão presentes, como massa, geometria, processo de manufatura e fornecedor. Porém, a evolução da equipe, ano após ano, implica em uma otimização de praticamente todos os componentes, seja na redução de massa, mudança do processo de produção ou adequação ao novo projeto de aeronave. Dessa forma, uma reutilização das peças, mesmo que na fase de projeto virtual, é bastante raro, onde até componentes padrão, como bateria, motor, fios e servos-controle são redimensionados.

Logo, a utilização de um software único de gerenciamento não teria todas as suas funcionalidades exploradas e teria maior sentido dentro de um ambiente industrial, de fabricação seriada, como na Indústria Aeronáutica comercial. Não foi possível aprofundar o estudo para uma das empresas do setor pela dificuldade de se obter informações de projeto e contatos suficientes para possibilitar o acompanhamento do dia a dia dos operadores e engenheiros. Porém, outros pontos descritos e discutidos ao longo deste PG explicam a aplicabilidade do BIM, principalmente no âmbito conceitual, o qual por si só resolveria uma boa parte dos problemas encontrados pela Draco Volans atualmente.

4.2.2 4ª dimensão: Cronograma

- Como é feito:

O conceito da 4ª Dimensão consiste no uso de ferramentas de faseamento temporal, ou seja, definição de um calendário de projeto compartilhados com toda a empresa. Todos os anos equipe Draco monta um cronograma de projeto logo após a divulgação do regulamento da competição, como o mostrado na Figura 4.3, referente ao ano de 2019. No diagrama, é possível identificar as diferentes etapas, com as respectivas previsões de início e conclusão.

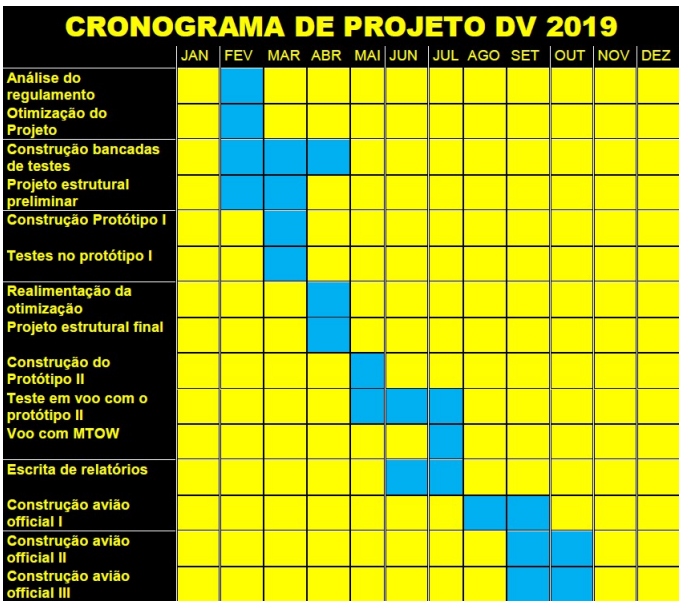


Figura 4.3: Cronograma proposto no início do ano de 2019 para o desenvolvimento do projeto de Aerodesign.

- Pontos a melhorar:

Por vezes, esse cronograma não é seguido da melhor forma, pois é o único controle que a equipe tem do tempo de projeto, o que resulta, por vezes, em atrasos e contratempos. Parte destes empecilhos também está relacionada aos recursos que a equipe tem disponíveis, algo que depende da atuação de patrocinadores, número de membros na equipe e auxílios promovidos pela própria Faculdade de Tecnologia. Porém, ainda assim, é possível otimizar o tempo gasto nas tarefas, através de uma melhor gestão de processos e, como citado na Seção 4.1, por uma comunicação melhor entre as áreas.

4.2.3 5ª Dimensão: Orçamentação

- Como é feito:

A solução do BIM para a previsibilidade orçamentária do projeto é baseada no próprio componente virtual, cujo arquivo contém informações sobre o fornecedor e preço de aquisição. Ano após ano a equipe faz o levantamento dos gastos e uma projeção para os gastos do próximo ano. É relevante citar que, todos os anos, o regulamento da competição é atualizado e, caso haja uma diferença muito significativa nas restrições, a estimativa de orçamento também é atualizada. Então, é feito um relatório de custos que pode ser usado em apresentações para patrocinadores e para a própria Universidade, a fim de angariar auxílios para a viagem até São José dos Campos e para gastos gerais do projeto. O orçamento do projeto de 2019 está descrito na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Orçamento da equipe Draco Volans do ano de 2019, incluindo componentes e serviços adicionados ao longo da fase de construção, não previstos pelo orçamento inicial.

ORÇAMENTO DV 2019

Material	Preço Unitario	Preço total
Hélice	R$ 58,00	R$ 290,00
ServoS	R$ 18,95	R$ 56,85
Starter Glow	R$ 40,00	R$ 80,00
Mufla	R$ 158,00	R$ 158,00
Tubos de Carbono	R$ 800,00	R$ 800,00
Resina Epoxi + Catalisador	R$ 300,00	R$ 300,00
Resina	R$ 150,00	R$ 450,00
Filme de churrasco	R$ 120,00	R$ 120,00
Luvas	R$ 20,00	R$ 120,00
Fibra de Carbono	R$ 1.150,00	R$ 1.150,00
Pell Ply	R$ 154,00	R$ 154,00
Perfurado	R$ 183,00	R$ 183,00
Breeder	R$ 200,00	R$ 200,00
Alumínio + Rolamento	R$ 150,00	R$ 150,00
Matriz	R$ 3.400,00	R$ 3.400,00
BALSA 1 mm	R$ 100,00	R$ 400,00
BALSA 2 mm	R$ 150,00	R$ 975,00
BALSA 3 mm	R$ 18,00	R$ 540,00
Arduino	R$ 60,00	R$ 120,00
Acelerômetro	R$ 25,00	R$ 50,00
Módulo de Rádio	R$ 50,00	R$ 50,00
Arduino Nano	R$ 30,00	R$ 30,00
Balança de Mão	R$ 20,00	R$ 40,00
2 HX711	R$ 20,00	R$ 40,00
1 PITOT	R$ 100,00	R$ 100,00
Cortes em aço	R$ 300,00	R$ 300,00
Célula de Carga A	R$ 40,00	R$ 80,00
Célula de Carga B	R$ 200,00	R$ 400,00
FILAMENTO 3D	R$ 100,00	R$ 200,00
Limpeza	R$ 50,00	R$ 50,00
Microlite	R$ 180,00	R$ 1.800,00
Fita Entelagem	R$ 5,00	R$ 50,00
Servo	R$ 90,00	R$ 540,00
Servo	R260$ou R$ 155	R$ 780,00
Receptor	R350$ou R$ 180	R$ 1.400,00
Bateria do controle	R$ 200,00	R$ 200,00
Células de carga 10 kg	R$ 40,00	R$ 120,00
Cortes a Laser A	R$ 1.000,00	R$ 1.000,00
Gabaritos de papel	R$ 200,00	R$ 200,00
Adesivos	R$ 80,00	R$ 80,00
Aluguel chácara competição	R$ 3.000,00	R$ 3.000,00
Inscrição Competição	R$ 1.235,00	R$ 1.235,00
CA	R$ 200,00	R$ 200,00
Kit Primeiros Socorros	R$ 25,00	R$ 25,00
Ferro de solda	R$ 25,00	R$ 25,00
Estanho	R$ 10,00	R$ 20,00
Fio flexivel jumper	R$ 75,00	R$ 75,00
Pinos macho/femea	R$ 50,00	R$ 50,00
Conector 4 pinos	R$ 10,00	R$ 10,00
Usinagens	R$ 2.000,00	R$ 2.000,00
Impressão 3d	R$ 500,00	R$ 500,00
Corte a laser	R$ 2.000,00	R$ 2.000,00
Frsky fx6r	R$ 150,00	R$ 150,00
Radio frsky taranis x9d plus SE	R$ 1.300,00	R$ 1.300,00
	Soma	**R$ 27.746,85**

Caso haja algum valor excedente arrecadado pelos membros da equipe, esse valor alimenta o caixa da equipe para projetos auxiliares, construção de aviões de reserva e compra de equipamentos adicionais para a oficina.

- Pontos a melhorar:

Por vezes, boa parte dos gastos é custeada por alguns membros específicos da equipe, algo que é natural, mas pode ser mitigado com um bom planejamento. Outra questão importante é a falta de patrocinadores e recursos suficientes para o projeto inteiro, o que exige a supressão de algumas etapas ou, por exemplo, viajar para a competição sem ter um avião adicional de reserva.

Porém, um dos empecilhos de se obter uma previsibilidade de custos efetiva é a mudança de configuração da aeronave ano após ano. A equipe evolui e novas técnicas de construção são exploradas. Tais mudanças implicam em gastos menores ou maiores na manufatura de um certo componente em relação ao método anterior. Dessa forma, a maneira mais eficiente de lidar com essa questão é fazer um levantamento histórico dos gastos da equipe e traçar uma média, computando os gastos com equipamentos comerciais recorrentemente utilizados.

4.2.4 6ª Dimensão: Sustentabilidade

Atualmente, assuntos que versam sobre a 6ª Dimensão, ou seja, sobre sustentabilidade e boas práticas ambientais, estão um tanto fora do escopo de projeto da Draco Volans Aerodesign. Porém, os membros buscam colocar em prática medidas para reduzir o consumo de energia e de água, naturalmente. Logo, o principal foco para essa questão deve ser no tempo. Reduzindo o tempo empregado para desempenhar as atividades, a equipe atinge, progressivamente, uma maior eficiência de gastos.

4.2.5 7ª Dimensão: Gestão das Instalações

- Como é feito:

A 7ª dimensão tem como escopo a otimização das instalações de uma obra, como a escolha do melhor caminho que uma tubulação deve percorrer ou o correto posicionamento de um chiller em um projeto de ar-condicionado. Como se trata de uma equipe de projeto de aeronaves, a Draco Volans não possui foco nas instalações físicas. Porém, essa dimensão pode se estender ao produto, que, no caso, é uma aeronave radiocontrolada e todos os fatores auxiliares ao projeto. Partindo desse ponto, não existe, atualmente, um banco de dados contendo manuais de construção, operação da aeronave, planos de reparo ou contatos padrão dos fornecedores.

A cada ano de projeto, o conhecimento é passado dos integrantes mais antigos aos mais novos, através de relatórios passados de projeto e por ex-membros, que são contatados frequentemente. Como o tempo médio de permanência do estudante na equipe é de 1,5 ano, acontece uma substituição quase total dos membros periodicamente e, são nesses momentos de menor sinergia que o desempenho na competição pode não equivaler à capacidade técnica dos integrantes.

- Pontos a melhorar:

Várias situações encontradas pela equipe podem ser contornadas com um banco de dados alimentado constantemente:

- Manuais de construção: erros de manufatura são recorrentes e, por vezes, são determinantes para o bom aproveitamento do tempo para execução das atividades. Uma boa fonte de relatos de experiências e boas práticas é essencial para enxugar o orçamento e construir um avião cada vez mais próximo ao modelo virtual;
- Manuais de projeto: após a entrada de novos membros na equipe, todos os anos, há um período de treinamento, antes do regulamento da competição ser divulgado, em que membros antigos responsáveis por cada área ensinam os mais novos. É um processo bastante eficiente, porém, caso uma área não tenha alguém apto a ensinar, mais tempo levará para a função ser desempenhada como antes e, muitas vezes, isso implica em um *reset* no conhecimento, onde o novo integrante deve aprender "do zero"sua nova função. Uma solução interessante é a criação de um banco de dados contendo todo o fluxo de projeto e tarefas desempenhadas por cada área, da forma mais palpável possível. Assim, os anos passarão e a equipe terá cada vez mais conhecimento acumulado;
- Contatos de fornecedores: todos os anos, no período de compra de materiais para construção das aeronaves, vários locais de compra são contatados, a fim de se obter o melhor preço, com as especificações requeridas. Os problemas encontrados aqui são vários: lojas estrangeiras que não exportam para o Brasil, custos altos de frete, falta de especificações suficientes, quantidade insuficiente de algum componente.

4.2.6 8ª Dimensão: Segurança

- Como é feito:

Esta dimensão foca em assuntos relacionados à Higiene e Segurança do Trabalho, buscando minimizar ao máximo os riscos de operação. Os integrantes da equipe aprendem uma boa prática aprendida nos cursos de Engenharia da Universidade de Brasília, que é a importância do uso de EPI (Equipamentos de Proteção Individual) em uma instalação ou ambiente industrial e, portanto, esse conceito é levado à oficina da equipe, não havendo complicações

quanto à saúde das pessoas. Há, inclusive, um orçamento dedicado à compra de equipamentos, como máscaras, luvas e kit de primeiros socorros, como citado no orçamento da Tabela 4.1.

- Pontos a melhorar:

É interessante separar uma parte do orçamento para a compra de EPI, a fim de promover um ambiente cada vez mais seguro para se trabalhar. Atualmente, a limpeza e organização da oficina ocorre esporadicamente, algo que pode ser feito de forma mais recorrente.

4.2.7 9ª Dimensão: Construção Enxuta *(Lean Construction)*

- Como é feito:

O principal ponto aqui é a redução de custos de projeto devido ao desperdício e ao uso consciente de materiais. Este é um ponto importante para o Aerodesign, pois os desperdícios gerados na construção das aeronaves são traduzidos em gastos que podem ser otimizados. A equipe tem um orçamento bastante limitado por natureza e, atualmente, todos os integrantes têm a consciência disso, evitando ao máximo desperdiçar os materiais.

- Pontos a melhorar:

Porém, sempre há espaço para melhora e restos de materiais podem ser usados como matéria para outros fins, como pequenos reparos. A principal vantagem, ao final do trabalho, é a otimização do tempo, redução de retrabalhos, o que pode ser mitigado também pela boa aplicação da 7ª dimensão. Alguns pontos de melhora na efetividade da construção são:

- Melhor mapeamento das empresas terceirizadas de corte a laser, usinagem;
- Definição de fornecedores de placas de aço, madeira balsa e fibra de carbono;
- Melhor definição no orçamento - compra da quantidade certa de materiais;
- Evolução do uso de softwares de simulação, a fim de evitar testes empíricos para o dimensionamento de componentes, como servos-controle e massa final da aeronave;
- Estimativa mais exata sobre a massa de componentes, considerando os processos de manufatura e agentes colantes;
- Melhor planejamento na realização das atividades que podem ser feitas em paralelo. Por exemplo, o processo de laminação do trem de pouso principal demora cerca de 8 horas para ser concluída e pode ser feita em paralelo a outras atividades. De certa forma, isso já é pensando, porém há a necessidade de um maior planejamento;

- Construção de gabaritos auxiliares para alinhamento do ângulo de ataque da aeronave em solo e para posicionamento da empenagem;
- Maiores investimentos em equipamentos e ferramentas mais específicas, como bisturis, máquina de ar quente e ferro de entelagem.
- Criação de uma rotina de limpeza e organização da oficina.
- Criação de janelas de treinamento envolvendo membros mais antigos e novos, a fim de transmitir boa práticas de oficina.

4.2.8 10ª Dimensão: Construção Industrializada

- Como é feito:

Atualmente, a equipe Draco Volans possui processos de manufatura que são feitos repetidamente através dos anos, como:

- Corte a laser das nervuras da asa;
- Alinhamento dos perfis através de gabaritos de MDF;
- Confeccção da nervura central - suporte para encaixe do motor (feita com material composto de fibra de carbono e Rohacell);
- Entelagem da aeronave.

Dessa forma, percebe-se uma recorrência dos métodos construtivos, porém não há uma padronização que envolva toda a manufatura, também pelo fato de que todos os anos o regulamento da competição é atualizado, impondo novas restrições aos modelos das equipes.

- Pontos a melhorar:

Entretanto, há um grande espaço para melhora no que diz respeito a essa dimensão, principalmente através do uso de manuais de manufatura e levantamento do contato das empresas terceirizadas - como corte a laser, impressão 3D, usinagem. Dentro do mesmo ano, as diversas aeronaves construídas podem seguir o mesmo fluxo construtivo e servir de ponto de partida para a escalada do modelo à Indústria Aeronáutica, por exemplo, mesmo que em um cenário acadêmico e experimental como o Aerodesign.

4.3 Aplicações práticas no projeto

A seção anterior mostrou os pontos onde o BIM pode atuar para otimizar o projeto de Aerodesign ao máximo, dentro da proposta inicial. Um entendimento fundamental para a implementação dessa metodologia é que as dimensões não necessariamente precisam ser aplicadas dentro de um software. Por exemplo, as dimensões de número 6 (Sustentabilidade), 7 (Gestão das Instalações), 8 (Segurança) e 9 (Construção Enxuta) podem estar presente no projeto através de manuais de projeto, de construção e de manufatura, encontrados nos repositórios de arquivos que a equipe pode constituir e atualizar todos os anos, além por meio da passagem de conhecimento dos membros mais antigos para os mais novos. Dessa forma, o conceito do BIM permeia todos os processos ao ser traduzido em uma cultura organizada de trabalho e de gerenciamento de projeto, seja através de um software ou não.

Partindo desse ponto, é necessário entender os benefícios reais de se montar um planejamento e gerenciamento de projeto propostos pelo uso dos conceitos da metodologia. As Tabelas 4.2 e 4.3 fazem uma relação das áreas da equipe e as competências do BIM com o tempo e os recursos gastos na execução das tarefas correspondentes.

4.3.1 Metodologia para otimização do tempo e custos do projeto

Com o estudo mostrado na Tabela 4.2, percebe-se que o BIM pode ser bem aplicado na interface entre as áreas ao melhorar a compatibilidade entre os arquivos, promover a criação de um banco de dados de manuais de projeto e construção e mapear o contato dos fornecedores. Aqui, analisa-se o tempo gasto em tarefas feitas envolvendo um membro da área de Desenho e Manufatura e da área correspondente, para compartilhamento de arquivos para simulações e para construção (Manufatura).

Os dados sobre o tempo gasto em cada atividade foram levantados através das experiências próprias em equipe, durante os anos de 2018 e 2019, na liderança da área de Desenho. Notoriamente, houve uma ineficiência dos processos e, por vezes, diversas horas eram gastas apenas nas iterações e retrabalhos. Sob essa ótica, estima-se que cerca de 50% do tempo gasto corresponde à resolução das dificuldades, devido ao processo de aprendizado no manuseio dos softwares e na compatibilidade entre os arquivos compartilhados. Não houve, porém, o uso de uma ferramenta precisa para medição do tempo gasto em cada atividade, pela alta carga de trabalho nos membros envolvidos. Por isso, uma solução eficiente para metrificar de forma mais precisa o tempo gasto é desenvolver um cronograma mais detalhado dessa etapa do trabalho, identificando cada contratempo e as causas de ocorrência, obtendo uma estrutura que poderá ser replicada nos projetos futuros, até atingir o ponto de eficiência máxima.

Outra questão importante é a construção da aeronave que, por causa da falta de manuais de trabalho, tem um tempo de conclusão cerca de 30% mais lento que o esperado. Esse tempo foi estimado pelo prazo em que a construção ficava estagnada, devido aos diversos

contratempos enfrentados, estando citado abaixo alguns deles:

- Impressão errada dos gabaritos em papel, para confecção do suporte do motor;
- Falta de compatibilidade entre os arquivos para corte a laser com o software da empresa contratada;
- Falta de treinamento de construção aos novos integrantes, o que era a causa de erros na geometria do suporte no motor no lixamento das nervuras, por exemplo;
- Falta de organização da oficina, fazendo com que o espaço de trabalho fosse limitado, levando parte da equipe a ficar ociosa;
- Ausência de um certo membro que sabia melhor como desempenhar uma função, quando esta era mais delicada;
- Estresse excessivo que alguns membros passaram, pela alta carga de trabalho, resultava em erros por falta de atenção.

Muitos desses itens, ao serem resolvidos, deixariam o ambiente de trabalho muito mais agradável e produtivo, motivando novos membros a se envolverem mais com o projeto e aumenta cada vez mais as chances da equipe de atingir melhores colocações na competição.

Áreas trabalhando em conjunto	Forma de otimização com BIM	Tempo normal de execução das tarefas	Economia de tempo estimada
Desenho, Aerodinâmica e Estabilidade	Melhor compatibilidade entre os arquivos e uso de manuais de projeto	3 a 4 horas	1 a 2 horas
Desenho e Estrutura	Melhor compatibilidade entre os arquivos e uso de manuais de projeto	4 a 6 horas	1 a 2 horas
Desenho, Elétrica e Desempenho	Uso de manuais de projeto	1 a 2 horas	0,5 a 1 hora
Desenho e Manufatura	Melhor compatibilidade entre os arquivos; uso de manuais de construção, projeto e mapeamento de fornecedores	12 a 16 dias (construção de uma aeronave)	4 a 5 dias

Tabela 4.2: Vantagens do uso do BIM no tempo de realização das tarefas na interface entre as áreas de projeto.

Atualmente, a realização das referidas atividades correspondem a cerca de 2 dias de trabalho ao início do projeto e 12 a 16 de dias na construção de cada aeronave. Com a otimização, esse tempo pode variar entre 9 e 13 dias, o que representa uma economia de

tempo na casa de 30%. Ao todo, se as relações forem feitas de forma mais eficiente, pela adoção do formato ".ifc", característico do BIM, e pela catalogação dos procedimentos em manuais, a equipe ganha mais 4 dias, em média, para desenvolver o projeto e produzir os relatórios.

Dessa forma, a equipe leva cerca de 70 a 150 dias para modelar todo o projeto, processo dividido em duas fases: fase de teste, que termina na construção de um protótipo e na fase de otimização, que termina na construção do avião oficial que vai para a competição em São José dos Campos - SP. Aqui, o uso de manuais de projeto será um elemento chave e pode resultar em uma economia de tempo de 8 a 10 dias, uma redução de até 10%, como visto na Tabela 4.3.

O cronograma de trabalho, apresentado no início do ano, tem duração de 10 meses (janeiro a outubro) e é possível haver uma redução de 14 a 19 dias pela otimização do projeto como um todo, referente às etapas de: renderização tridimensional (8 a 10 dias); gestão das instalações (4 a 5 dias para cada aeronave); construção enxuta (1 a 2 dias para cada aeronave construída) e construção industrializada (1 a 2 dias para cada aeronave).

Na gestão das instalações (no caso, do produto), o BIM tem melhor uso na utilização dos banco de dados de informações e planos de projeto, o que resulta em uma economia de 4 a 5 dias de trabalho para cada aeronave manufaturada. Nas dimensões que versam sobre construção enxuta e industrializada, a otimização do projeto como um todo pode resultar em uma economia de 1 a 2 dias de trabalho para cada, pela melhor utilização dos materiais, evitando o desperdício e reaproveitando-os, quando possível.

Por fim, quanto aos recursos empregados, a Tabela 4.3 mostra o balanço estimado de recursos para o orçamento referente ao projeto de 2019, para uma otimização via BIM. Percebe-se que cerca de R$2300,00 poderiam ter sido economizados pela otimização geral do projeto, o que representa 8,5% do custo total de projeto, de R$27.750, como visto na Tabela 4.1.

Tabela 4.3: Vantagens do uso do BIM segundo o tempo e recursos gastos para cada dimensão.

Dimensão	Forma de otimização com BIM	Tempo Normal de Execução	Economia de Tempo Estimada	Balanço estimado de Recursos
3ª: Renderização Tridimensional	Otimização da interface entre as áreas e uso de manuais de projeto	Protótipo: 80 a 90 dias; Projeto oficial: 30 a 40 dias; Tempo total: 110 a 130 dias (fase de projeto - fev a jun)	8 a 10 dias	N/A
4ª: Cronograma	Otimização do projeto como um todo	10 meses (janeiro a outubro), divididos em fase de projeto e de manufatura	14 a 19 dias	N/A
5ª: Orçamentação	Otimização do projeto como um todo	N/A	N/A	-R$1.530,00
6ª: Sustentabilidade	Otimização do projeto como um todo	N/A	N/A	N/A
7ª: Gestão das Instalações	Uso de manuais de construção, projeto e contato dos fornecedores	10 meses (janeiro a outubro), divididos em fase de projeto e de manufatura	4 a 5 dias para cada aeronave construída	-R$150,00/avião
8ª: Segurança	Plano de incentivo para o uso de EPI	N/A	N/A	+R$50,00/ano
9ª: Construção Enxuta	Otimização do projeto como um todo	70 a 90 dias (fase de manufatura)	1 a 2 dias para cada aeronave construída	-R$530,00
10ª: Construção Industrializada	Otimização do projeto como um todo, utilização de manuais, orçamento bem definido	10 meses (janeiro a outubro), divididos em fase de projeto e de manufatura	1 a 2 dias para cada aeronave construída	N/A

A Tabela 4.4 exemplifica os materiais que tiveram custos adicionais de aquisição, devido a desperdícios e erros de projeto, como foi o caso da usinagem das rodas feitas de Náilon, onde foi fornecida à oficina um desenho técnico cujas medidas estavam superdimensionadas. Dessa forma, vê-se que, no custo total de R$9.020,00, R$1.530 poderiam ter sido usados na construção de uma outra aeronave ou projeto auxiliar, uma economia de 17%, aproximadamente.

Tabela 4.4: Serviços utilizados que mostraram ineficiência de gastos, por desperdício de materiais e falhas de comunicação.

Serviços e Materiais	Custo	Custo por ineficiência
Gabaritos de Papel	R$ 300,00	R$ 100,00
Madeira Balsa	R$ 2.500,00	R$ 250,00
Filme PVC (laminação)	R$ 120,00	R$ 30,00
Tubos de Carbono	R$ 800,00	R$ 150,00
Cortes em aço	R$ 300,00	R$ 50,00
Cortes a Laser	R$ 3.000,00	R$ 250,00
Usinagens	R$ 2.000,00	R$ 700,00
SOMA	R$ 9.020,00	R$ 1.530,00

Em suma, o principal fator considerado para atingir os números citados foi o desperdício. Com um planejamento melhor das atividades através de um conjunto de diretrizes para cada processo, a equipe consegue economizar não somente no tempo, mas também no custo de manufatura. Além disso, uma boa capacitação dos integrantes resultará em menos erros construtivos, como aqueles mencionados na Seção 3.6.1

Capítulo 5

Conclusões e Comentários

O presente Projeto de Graduação teve como objetivo o estudo da aplicabilidade do BIM no projeto de aeronave da equipe Draco Volans Aerodesign, partindo da ótica de que já existe, na Indústria, uma metodologia eficiente de gerenciamento de projeto: o PLM. Assim, uma comparação entre esta e o BIM também foi desenvolvida, a fim de traçar um paralelo entre os universos da equipe de competição e da Indústria e embasar trabalhos futuros que busquem intensificar o estudo da implementação do BIM na Engenharia Mecânica. A metodologia utilizada, baseada nas revisões bibliográficas e no estudo do fluxo de projeto e manufatura da Equipe Draco Volans Aerodesign, permitiram que os objetivos do Projeto de Graduação fossem atingidos, levando às considerações e conclusões apresentadas a seguir.

A maior diferença do BIM para o PLM é a padronização da linguagem entre diferentes companhias, uma vez que dentro de uma mesma empresa participante de toda a cadeia de produção, o PLM atende bem os requisitos. Porém, em um cenário de linha de produção onde os produtos chegam de diferentes fornecedores e, muitas vezes, não estão no estado final de entrega, o BIM ganha vantagem. Portnto, como introduzido no Capítulo 1, um estudo na viabilidade do uso da metodologia BIM deve ser guiado de forma a potencializar os métodos já existentes de produção e gerenciamento de projeto através do PLM, acrescentando funcionalidades de acordo com as competências existentes.

Quanto às dimensões do BIM, percebe-se que elas são aplicadas, mesmo que de forma inicial, pela equipe de Aerodesign estudada nesse PG. Viu-se que elas são melhor exploradas através de um gerenciamento de projeto baseado em manuais de projeto, de construção e de manufatura, reunidos em um repositório acessível a todos os membros da equipe, o que prova a eficiência dos conceitos do BIM, tido como um guia de melhoramento geral da equipe. Porém, o uso de um software único para gerenciamento - principal proposta do BIM, fica prejudicado pelo cenário extremamente dinâmico do Aerodesign, onde o projeto muda todos os anos, e também pelo estado atual da equipe, que está se reestruturando após o período de pandemia, sem construção de aviões.

Além disso, a maior parte dos problemas encontrados podem ser resolvidos pela otimiza-

ção do tempo gasto nas atividades de interface entre as áreas de projeto e de manufatura, onde os retrabalhos e a falta de coordenação entre os processos representam as principais causas desses problemas. As estimativas descritas nas Tabelas 4.2 e 4.3 mostram que é possível ter uma economia de cerca de 50% no tempo e até 30% nos recursos empregados aplicando-se as dimensões do BIM; algo de extrema importância para uma equipe de competição.

Portanto, este trabalho funciona como um ponto de partida para a aplicação BIM na equipe Draco Volans Aerodesign a partir do qual é possível montar um plano de ação para a equipe de competição, com duração de 1 ou 2 anos, que ateste as estimativas feitas no Capítulo 4. Concluída essa etapa, outros projetos podem ser desenvolvidos para estender a aplicação ao projeto aeronáutico comercial ou a outras equipes da Universidade de Brasília, como o Baja ou Fórmula SAE, as quais constantemente estão buscando soluções inovadoras para seus trabalhos. Sob essa ótica, uma ideia para projetos futuros seria a aplicação dos manuais de projeto e, posteriormente, a avaliação de um único software para gerenciamento geral da equipe, seja através do solidworks (já utilizado) ou por outra solução.

Por fim, este Projeto de Graduação também mostra que uma interação efetiva entre os ensinamentos do curso de Engenharia Mecânica e a realidade industrial requer um grande conhecimento das ferramentas e softwares de gerenciamento de projeto, com a finalidade de desenvolver um produto que não somente cumpra sua função de engenharia, mas também seja comercialmente competitivo.

Referências Bibliográficas

Aeropole. Aeropole. Disponível em https://www.aeropole.fi/items/c152-oh-cap//. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Anderson Rodrigues. A era bim. Disponível em: http://www.engenhariaearquitetura.com.br/2020/09/a-era-bim. Acesso em: 17 de outubro 2021, 2020.

Atrium Engenharia Jr. As dimensões do bim. Disponível em: https://atriumengenhariajr.com.br/index.php/2021/06/30/as-dimensoes-do-bim/.Acessoem:22deoutubro2021 year=2018.

Autodesk. Product data management (pdm). Disponível em: https://www.autodesk.com/solutions/pdm-product-data-management#!. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Bernard Marr. The fascinating history and evolution of extended reality (xr) – covering ar, vr and mr. Disponível em https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2021/05/17/the-fascinating-history-and-evolution-of-extended-reality-xr--covering-a?sh=581471384bfd year=2021.

Bio-architecture Formosana. Campus central de inovação de taiwan moea. Disponível em https://www.archdaily.com.br/br/790637/central-taiwan-innovation-campus-moea-bio-architecture-formosana-plus-no ad_source=search&ad_medium=projects_tab. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Blog Airway. Blog airway. Disponível em https://www.airway.com.br/os-avioes-comerciais-mais-importantes-da-historia/. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Camila Casarotto. Por que você deve ter um pdm (product data management) para aumentar a sua produtividade. Disponível em: https://rockcontent.com/br/blog/pdm/. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Canal Piloto Bianch. Sikorsky ilya muromets: Um herói da mitologia russa. Disponível em http://canalpiloto.com.br/sikorsky-ilya-muromets-um-heroi-da-mitologia-russa/. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Dassault Systèmes. Enovia v5 vpm solutions. Disponível em: https://www.3ds.com/products-services/enovia/products/enovia-v5/latest-release/domain/ENOVIA_V5_VPM/.Acesso em: 22 de outubro 2021.

Denise Fontes. Ciscea realiza 2º workshop bim do sistema de controle do espaço aéreo brasileiro. Disponível em https://www.decea.mil.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=ciscea-realiza-2o-workshop-bim-do-sistema-de-controle-do-espaco-aereo-b year=2019.

Desktop Engineering. What is plm? why catia on the cloud? what is iot? what is power'by? who is dassault systemes? why get catia v5 certified? Disponível em: https://www.dte.co.uk/glossary-who-what-when-why-how/. Acesso em: 02 de novembro de 2021.

Digital Engineering 247. Ptc and volvo group form digital engineering collaboration. Disponível em: https://www.digitalengineering247.com/article/ptc-and-volvo-group-form-digital-engineering-collaboration/. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Diogo de Oliveira. Os aviões comerciais mais importantes da história. Disponível em: https://diogooliver33.jusbrasil.com.br/artigos/380985799/historico-evolutivo-da-aviacao-civil-e-a-necessidade-da-regulamentacao- Acesso em: 22 de outubro 2021.

DONINI. AnÁlise computacional do perfil aerodinÂmico modelo naca 0012. Disponível em http://www.lo.unisal.br/sistemas/sipet2020/trabalhos/heitor_fabricio@outlook.com_224317.pdf. Acesso em: 22 de outubro 2021.

C. Eastman, J.-m. Lee, Y.-s. Jeong, and J.-k. Lee. Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in construction*, 18(8):1011–1033, 2009.

J. T. Edison da Rosa. *INTRODUÇÃO AO PROJETO AERONÁUTICO, Uma Contribuição à Competição SAE-Aerodesign*. UFSC/GRANTE, 1a edição edition, 2006.

Estevam pelo mundo. Estevam pelo mundo. Disponível em https://estevampelomundo.com.br/aeroportos/quais-os-tipos-de-aviao-que-existem/. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Fábio Maciel. Ciscea realiza 2º workshop bim do sistema de controle do espaço aéreo brasileiro. Disponível em https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/32574/TECNOLOGIA%20-%20Implantaç~ao%20da%20tecnologia%20BIM%20na%20elaboraç~ao%20de%20projetos%20é%20tema%20de%20workshop%20da%20CISCEA year=2018.

Gartner. Gartner identifies three megatrends that will drive digital business into the next decade. Disponível em https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-08-15-gartner-identifies-three-megatrends-that-will-drive-digital-b year=2017.

Governo Federal. Comitê estratégico de implementação do bim (ce-bim). Disponível em https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/mdic/competitividade-industrial/comite-estrategico-de-implementacao-do-bim-ce-bim year=2018.

Guia do Aviador. Guia do aviador. Disponível em http://guiadoaviador.blogspot.com/2014/02/partes-do-aviao-parte-1.html. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Gustavo da Fonseca. Estudo de forças mássicas no fator de carga de uma aeronave rádio controlada. Disponível em https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/109179/000949368.pdf?sequence=1. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Hangar MMA. Quais as partes estruturais de uma asa de avião. Disponível em https://hangarmma.com.br/blog/partes-estruturais-de-uma-asa-de-aviao/. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Hufton + Crow. Centro cultural da juventude de nanjing / zaha hadid architects. Disponível em https://www.archdaily.com.br/br/907192/centro-cultural-da-juventude-de-nanjing-zaha-hadid-architects. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Ibec Ensino. Entenda o que é bim 10d e como é feita sua implementação em projetos. Disponível em: https://ibecensino.org.br/blog/entenda-o-que-e-bim-10d-e-como-e-feita-sua-implementacao-em-projetos/. Acesso em: 17 de outubro 2021, 2021.

Instituto de Engenharia. Realidade virtual nos projetos de engenharia. Disponível em https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2015/10/07/realidade-virtual-nos-projetos-de-engenharia/ year=2015.

Juliana Nakamura. Conheça 4 aplicações práticas de bim. Disponível em https://www.sienge.com.br/blog/conheca-4-aplicacoes-praticas-de-bim/ year=2018.

J. V. Kumar and M. Mukherjee. Scope of building information modeling (bim) in india. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2(1):165–169, 2009.

Luiz Gustavo de Oliveira. Influência das ferramentas de cad em um projeto aeronáutico. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26592/3/InfluênciaFerramentasCAD.pdf. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Matheus Cardoso. Análise estrutural dos esforços sofridos durante o voo de um avião boeing usando o método dos elementos finitos. Disponível em https://docplayer.com.br/42951328-Analise-estrutural-dos-esforcos-sofridos-durante-o-voo-de-um-av html. Acesso em: 22 de outubro 2021.

NASCIDOS PARA VOAR. IntroduÇÃo ao estudo dos fluidos. Disponível em http://www.lo.unisal.br/sistemas/sipet2020/trabalhos/heitor_fabricio@outlook.com_224317.pdf. Acesso em: 22 de outubro 2021.

Paul Withey. The real story of the comet disaster. Disponível em https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2019_01_24_Comet.pdf year=2019, a.

Paul Withey. The real story of the comet disaster. Disponível em https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/dglr/hh/text_2019_01_24_Comet.pdf year=2019, b.

Presidência da República, Secretaria-Geral. Decreto presidencial - decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019 - estratégia nacional de disseminação do building information modelling. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D9983.htm. Acesso em: 17 de outubro 2021, 2019.

PTC, Creo Parametric. Creo: Design. do jeito que ele deveria ser. Disponível em: https://www.ptc.com/pt/products/creo. Acesso em: 22 de outubro 2021.

D. P. Raymer. *Aircraft Design: A Conceptual Approach*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2a edição edition, 1992.

L. E. M. J. Rodrigues. *FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA AERONÁUTICA - aplicações no projeto SAE-Aerodesign*. Edição do Autor, 1a edição edition, 2011.

Siemens. Building information modeling. Disponível em: https://new.siemens.com/global/en/products/buildings/digital-building-lifecycle/bim.html. Acesso em: 22 de outubro 2021, a.

Siemens. Software de gerenciamento de ciclo de vida de produtos (plm). Disponível em: https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/our-story/glossary/product-lifecycle-management-plm-software/12506. Acesso em: 22 de outubro 2021, b.

Siemens Software. Catia plm integration with teamcenter using active workspace. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=BvkNj54uB_s.Acesso em: 22 de outubro 2021.

Sienge. Plataforma bim exigência pelo governo federal inicia em 2021. Disponível em https://www.sienge.com.br/blog/plataforma-bim-2/ year=2021.

Terravista Brasil. Terravista brasil. Disponível em https://terravistabrasil.com.br/conheca-os-diferentes-tipos-de-avioes-militares-existentes/. Acesso em: 22 de outubro 2021.

The Museum of Flight. de havilland d.h. 106 comet mk. 4c. Disponível em https://www.museumofflight.org/aircraft/de-havilland-dh-106-comet-mk-4c year=2019.

Thiago Vinholes. Os aviões comerciais mais importantes da história. Disponível em: https://www.airway.com.br/os-avioes-comerciais-mais-importantes-da-historia/. Acesso em: 22 de outubro 2021, a.

Thiago Vinholes. Histórico evolutivo da aviação civil e a necessidade da regulamentação internacional. Disponível em: https://www.airway.com.br/os-avioes-comerciais-mais-importantes-da-historia/. Acesso em: 22 de outubro 2021, b.

Tony Hisgett. Comet. Disponível em https://www.flickr.com/photos/37804979@N00/3446772729/ year=2009.

United-BIM. What are bim dimensions – 3d, 4d, 5d, 6d, and 7d bim explained. Disponível em: https://www.united-bim.com/what-are-bim-dimensions-3d-4d-5d-6d-7d-bim-explained-definition-benefit
Acesso em: 17 de outubro 2021, 2020.

G. A. van Nederveen and F. P. Tolman. Modelling multiple views on buildings. *Automation in Construction*, 1(3):215–224, 1992.

VIA - UFSC. Inovação na construção civil: realidade virtual.

Washington Luke. Bim na valec. Disponível em: https://frenlogi.org/wp-content/uploads/2021/07/LANCAMENTO-CAMARA-TEMATICA-BIM-14JUL21.pdf. Acesso em: 02 de novembro de 2021.

Young Chae Park. Biblioteca nacional de sejong city. Disponível em https://www.archdaily.com.br/br/01-158148/biblioteca-nacional-de-sejong-city-slash-samoo-architects-and-engineers?ad_source=search&ad_medium=projects_tab. Acesso em: 22 de outubro 2021.