

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Vinícius Francisco Santos Da Silva**

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE PROTOTIPAGEM  
RÁPIDA AO DESENVOLVIMENTO DE AERONAVES**

**TAUBATÉ – SP**

**2017**

**Vinícius Francisco Santos Da Silva**

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA AO  
DESENVOLVIMENTO DE AERONAVES**

Monografia apresentada para obtenção da certificação de pós-graduação em Engenharia Aeronáutica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Engenharia Aeronáutica.

Orientador: Prof. Ms. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto.

**Taubaté – SP**

**2017**

**Vinícius Francisco Santos Da Silva**

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA AO  
DESENVOLVIMENTO DE AERONAVES**

Monografia apresentada para obtenção da certificação de pós-graduação em Engenharia Aeronáutica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Engenharia Aeronáutica.  
Orientador: Prof. Ms. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto.

**Data: 01/04/2017**

**Resultado:\_\_\_\_\_**

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.Esp Amanda Almeida – Universidade de Taubaté**

**Assinatura:\_\_\_\_\_**

**Prof.M.e Pedro Marcelo Alves Ferreira – Universidade de Taubaté**

**Assinatura:\_\_\_\_\_**

## DEDICATÓRIA

Para meus pais, minha esposa, meus irmãos e para meu orientador que acreditaram nas minhas ideias e me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a DEUS por vossa benção tão imensa em minha vida, por me ter criado e por fazer de mim o que sou hoje por Sua Graça eterna.

Agradeço aos meus pais Sandra e Antônio pelo carinho, amor caráter e responsabilidade com que me criaram e me fizeram ser.

Agradeço a minha amada esposa por tudo que é, por ter me ajudar nos momentos difíceis e por acreditar em mim.

Agradeço aos meus irmãos Gustavo e Tiago e aos meus amigos pelo apoio.

Agradeço aos meus colegas da classe de Especialização em Engenharia Aeronáutica na UNITAU, em especial ao Luiz Paulo pelo auxílio na modelagem 3D.

Agradeço ao meu orientador Pedro Marcelo por ser um profissional modelo para mim.

Agradeço a UNITAU pela estrutura e pelos maravilhosos professores aos quais nos deram aulas magnificas, em especial a professora Amanda pela grande dedicação e carinho para conosco.

Agradeço por fim aos colegas do SENAI e ISITEC as instituições das quais tiro o meu sustento e me dão suporte para meus trabalhos e aos colegas da Caos Focado pela Impressão do modelo da minha aeronave.

“The tragedy of life is what dies inside a man while he lives”.

**Albert Schweitzer**

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar de forma sistêmica um modelo para o desenvolvimento de uma aeronave por meio da aplicação de técnicas de prototipagem rápida. Para tal desenvolvimento são aplicadas técnicas de projetos de aeronaves com o uso de modelamento conceitual, a partir de parâmetros de projetos correlacionados com certa categoria de aviões, e posteriormente gerando um projeto preliminar, ao ponto que com o uso do projeto preliminar possa ser gerado um modelo de aeronave que pode ser reproduzida em uma escala para que com isso seja possível a aplicação em metodologias e ferramentas de prototipagem rápida. As prototipagens rápidas provem do movimento denominado *Maker*, onde tem total envolvimento no que se refere às perspectivas de modificações na produção industrial, portanto podem-se definir como ferramentas de prototipagem as relacionadas com a criação de modelos físicos, como os métodos de impressão 3D, sistemas eletrônicos com controle baseado em Arduino e na aplicação de métodos de design como o método do Design Thinking.

Palavras Chaves: Modelo, Aeronave, Prototipagem Rápida, Design Thinking

## **ABSTRACT**

This work aims to present a systemic model for the development of an aircraft by means of the application of rapid prototyping techniques. For this development, aircraft design techniques are applied with the use of conceptual modeling, from project parameters correlated with a certain category of aircraft, and later generating a preliminary project, to the point that with the use of the preliminary design a model is generated Of aircraft that can be reproduced in a scale so that it is possible the application in methodologies and tools of rapid prototyping. The rapid prototyping comes from the movement called Maker, where it has full involvement regarding the prospects of changes in the industrial production, therefore it is possible to define as prototyping tools those related to the creation of physical models, such as 3D printing methods , Electronic systems with Arduino-based control, and the application of design methods such as the Design Thinking method.

Keywords: Model, Aircraft, Rapid Prototyping, Design Thinking

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Distribuição de potência do Boeing 787 .....	23
Figura 2 – P56 – Paulistinha .....	26
Figura 3 – Cessna 172 Skyhawk.....	27
Figura 4 – Driver de controle do Motor Principal Trifásico.....	32
Figura 5 – Amperímetro Alicate.....	32
Figura 6 – Bateria de 9V e 450mA/h definida para o UPVT -1 .....	34
Figura 7 – Perfil Naca 0018.....	35
Figura 8 – Relação dos Coeficientes Aerodinâmicos Perfil Naca 0018.....	36
Figura 9 – Asa do UPVT – 1 configurado para Impressão 3D.....	37
Figura 10 – Impressão 3D .....	38
Figura 11 – Modelo 3 Vistas UPVT-1 .....	40
Figura 12 – Fluxo do Sistema eletroeletrônico do UPVT -1 .....	41
Figura 13 – Rádio controle Futaba utilizado no Projeto UPVT – 1 .....	41
Figura 14 – Modelo 3D.....	42
Figura 15 - Vista da Pré-Montagem do Protótipo do UPVT – 1.....	43
Figura 16 -Vista das peças Impressas do Protótipo do UPVT – 1.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – DADOS P-56 PAULISTINHA.....	26
Tabela 2 – DADOS CESSNA 172 SKYHAWK.....	28
Tabela 3 – VALORES MÉDIOS – PARÂMETROS COMPARATIVOS.....	29
Tabela 4 – PARÂMETROS DIMENSIONAIS DA AERONAVE UPVT - 1.....	30
Tabela 5 – Coordenadas X e Y Perfil NACA 0018.....	35

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Potência Motor trifásico ..... **Erro! Indicador não definido.**1

Equação 2 – Potência Motor do UPVT - 1 ..... **Erro! Indicador não definido.**3

Equação 3 – Potência da bateria comercial ..... **Erro! Indicador não definido.**3

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AR- Razão aspeto
- b- Envergadura [m]
- CL- Coeficiente de sustentação
- mm- Milímetros
- m<sup>2</sup>- metro quadrado
- N/m- Newton por metro
- CMA- Corda média aerodinâmica
- S- Área [m<sup>2</sup>]
- s- Segundo
- W- Watt
- V- Tensão Elétrica [V]
- λ- Razão de afilamento
- CAD- Computer Aid Design, em português Desenho Auxiliado pelo Computador
- 3D- Três dimensões altura, largura e comprimento
- 2D- Duas dimensões largura e comprimento

## SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT .....	8
LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABELAS .....	10
LISTA DE EQUAÇÕES .....	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	12
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo Geral.....	14
1.2 Objetivo Específico .....	14
1.3 Justificativa .....	14
2. REVISÃO LITERÁRIA .....	18
2.1. Prototipagem Rápida .....	18
2.2. Projeto Conceitual .....	20
2.3. Projeto Preliminar.....	21
2.4. Impressão 3d.....	21
2.5. Eletrônica Embarcada .....	22
2.6. Motores Elétricos.....	24
3. METODOLOGIA .....	25
3.1. PROJETO CONCEITUAL.....	25
3.1.1. P-56 Paulistinha.....	25
3.1.2. Cessna 172 Skyhawk .....	27
3.1.3. Parâmetros de projeto.....	28
3.2. PROJETO ELÉTRICO.....	30
3.2.1. Motor Elétrico Trifásico aplicado a Aeronaves .....	31
3.2.2. Levantamento de dados do Motor Elétrico.....	31
3.3. PROJETO FINAL .....	34

3.3.1. Perfil Aerodinâmico.....	34
3.3.2. Modelagem 3D.....	36
3.3.3. Prototipagem.....	37
4. RESULTADOS .....	40
4.1. Projeto Conceitual .....	40
4.2. Projeto Elétrico .....	41
4.3. Protótipo Final .....	42
5. CONCLUSÃO.....	45
6. BIBLIOGRAFIA.....	46
ANEXO.....	47

## 1. INTRODUÇÃO

O sonho de voar faz parte do que há em todo ser humano, onde cada ser de forma lúdica transcreve os meios com o qual seja possível a realização de tal sonho, onde desde tempos antigos onde se tem histórias de gregos e romanos que tinham como objetivo a criação de máquinas que possuíam asas, ou então até Leonardo da Vinci e suas ideias de uma máquina voadora girante, enfim, há vários relatos de situações onde o homem tenta alcançar os céus. Com tanta vontade de se atingir as nuvens o homem cada vez mais buscou ir mais longe nas formas de se tentar fazer tal ação acontecer realmente, até se colocando em situações de alto risco, como no caso dos irmãos Wright, aos quais se colocaram em um planador baseado em um projeto alemão datado do século XVIII (ANDERSON, 2015).

Com o passar dos tempos, a vontade de sair do chão e se colocar no mesmo nível das nuvens se tornou realidade por meio da criação de máquinas que efetivamente possuíam a característica de uma máquina voadora, que ao passar dos anos foram se evoluindo e se transformando no que chamamos hoje de aviões, foguetes, planadores, helicópteros e outros tantos mais tipos de aeronaves. Por tal fato, ao ponto que tais máquinas foram se tornando cada vez mais complexas, foi se inserindo cada vez mais sistemas, onde esses sistemas começaram a ter maiores exigências de confiabilidade e mais ainda após alguns momentos difíceis quando se tornou um modelo de negócio, a ciência teve que entrar com as implementações de conceitos e análises dos fenômenos que envolviam o voo (ANDERSON, 2015).

No estado da arte, pode-se dizer que a ciência aeronáutica foi desenvolvida por meio da necessidade de se adaptar as vontades de se voar com as necessidades e demandas mercadológicas, sendo, portanto tais fatores os quais criaram o que se conhece hoje como engenharia aeronáutica e engenharia aeroespacial (JENKINS, et al., 2004), gerando assim um movimento de criação de novas tecnologias de forma perene, pois ao ponto que tal área se tornou um meio de se agregar valores culturais, integração entre continentes por meio de voos transcontinentais e principalmente a criação de um negócio financeiramente sustentável (MASON, 2004).

Diante da necessidade inerente de se desenvolver novas aeronaves, o processo para desenvolvimento de métodos e aplicação de conceitos se faz imprescindível as demandas atuais (MASON, 2004), portanto com a utilização de design de engenharia e com a utilização de ferramentas de manufatura é possível então a evolução tanto dos processos de projeto, quanto dos processos de manufatura (JENKINS, et al., 2004). Perante do exposto, há de se agregar que diante de uma inerente inserção de tecnologias de prototipagem rápida, como impressão 3D, corte a laser e eletrônica embarcada, é inerente a aviação a adaptação dos processos de ideação e projetos conceituais desenvolvimentos com o auxílio de tais técnicas, pois se trata de um momento onde a tecnologia deve ser aliada aos requisitos de design, ou seja, atendimento das expectativas dos stakeholders e também alinhamento com relação a questão empreendedora (ANDERSON, 2012).

Contanto que haja um alinhamento em relação aos conceitos e aplicação dos métodos de engenharia e os métodos de prototipagem rápida, há uma grande chance de efetivamente um projeto produzir menores falhas na etapa de validação do produto (ANDERSON, 2012), nesse caso o produto sendo uma aeronave.

Portanto, com a utilização de ferramentas de engenharia aliadas a aplicação de técnicas de prototipagem rápida (ANDERSON, 2012) é possível o desenvolvimento metodológico de um processo onde haja uma rápida assimilação da equipe de engenharia quanto à missão da aeronave (Raymer, 1992) e também uma rápida assimilação por parte da aplicação do produto em meio aos processos de operação (MASON, 2004). Com isso a ideação (ANDERSON, 2012) da aeronave pode ser muito bem entendida por todos envolvidos no desenvolvimento do produto e conseqüentemente obter ganho de tempo no que diz respeito ao produto final, transcrevendo assim um caminho para entender as melhores tecnologias a serem utilizados na aeronave, os melhores materiais que serão usados para a construção dessa aeronave e também os processos de manufatura (MASON, 2004) cujo objetivo é desenvolver um método eficiente de prototipagem com validações das mais assertivas possíveis (ANDERSON, 2012).

## **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho descreve como desenvolver um modelo de aeronave aplicando ferramentas de prototipagem rápida aliadas a técnicas modernas de desenvolvimento de aeronaves e utilizando bases de engenharia aeronáutica através de revisão de literatura. Com estas técnicas apresentadas se tem o objetivo de ganhar tempo no processo para projetar novos produtos aeronáuticos e dar mais bases para estruturar o processo de fabricação baseado em processos de ideação e de testes em protótipos, para amenizar erros de engenharia no produto final e garantir comercialmente a experiência do cliente para com o produto.

## **1.2 Objetivo Específico**

- 1- Aplicar uma metodologia de projeto afim de estimar um projeto preliminar baseado em análise de estimativas para execução de uma aeronave;
- 2- Aplicar ferramentas de prototipagem rápida no desenvolvimento de aeronaves.
- 3- Desenvolver um método de desenvolvimento de protótipos com o intuito de aprimorar e diminuir o tempo de aplicação a um protótipo final.

## **1.3 Justificativa**

Normalmente a indústria aeronáutica usa o processo de desenvolvimento de produto de forma ortodoxia em projetos de aeronaves, a qual se baseia no processo em que se transformam ideias em métodos e, em seguida, em protótipo. Após este processo apresentado, projetistas e engenheiros aplicam técnicas para detalhar o projeto e conhecimentos de engenharia de diversas áreas usando o princípio da física, traduzindo em dados técnicos, que posteriormente são transcritos na forma de desenhos e,

finalmente, passa-se ao processo de manufatura da aeronave. Com base nesse processo citado, é proposta por esse trabalho a aplicação de metodologias do chamado método *Maker*, onde se aplicará a partir de um projeto conceitual, métodos de utilização de ferramentas de prototipagem rápida com o intuito de se desenvolver um protótipo passível de testes e análises, fazendo assim comprovar a diminuição do tempo de produção de uma aeronave comercial.

## **2. REVISÃO LITERÁRIA**

### **2.1. Prototipagem Rápida**

O processo de desenvolvimento de uma aeronave é composto por um conjunto de atividades de alta complexidade e que demandam uma compreensão avançada dos conteúdos que formam os sistemas do avião. Por tal fator supracitado é de extrema importância à dedicação integral de um setor de engenharia no desenvolvimento de uma aeronave em relação aos requisitos de atendimento, seja esses requisitos relacionados a questões de aeronavegabilidade ou de segurança de voo. Portanto pode-se entender que uma aeronave é um conjunto de sistemas com o objetivo de se tornar em uma máquina voadora(JENKINS, et al., 2004).

Diante do contexto com relação ao desenvolvimento de aeronaves, faz-se necessária a análise quanto ao tempo que é despendido para se desenvolver tal projeto, sendo que dependendo da formatação de uma equipe de projeto ou a setorização de uma equipe de desenvolvimento de produto será fornecido ao mercado um produto que não pode competir com as demandas atualizadas em relação ao escopo inicial de projeto (MASON, 2004). Portanto a necessidade de se avaliar ferramentas de prototipagem que possam fornecer critérios efetivos de design e composições de mercado que possam ser transcritas em atendimento do produto para com as necessidades dos usuários de tal aeronave é essencial para a correta relação de desenvolvimento de engenharia.

De acordo com (MASON, 2004), os critérios para desenvolvimento de uma aeronave se dá pelos critérios relacionados à demanda de passageiros, alcance da aeronave, carga paga, configurações de decolagem e aterrissagem, velocidade de cruzeiro, os fatores para se desenvolver uma manufatura que possa fabricar tal aeronave, materiais e tecnologias a serem aplicadas, além das capacidades estruturais e organizacionais do fabricante. Por isso, diante de uma demanda extremamente criteriosa para o desenvolvimento de uma aeronave, conforme mostra as definições e interações em cada sistema

(Raymer, 1992), é possível determinar que com a aplicação de ferramentas e processos inovadores, seja possível o desenvolvimento de um projeto robusto com menos tempo de desenvolvimento teórico e com mais tempo de desenvolvimento prático, causando assim uma drástica diminuição nos possíveis equívocos em projetos e dando a aeronave atualizações contemporâneas para o desenvolvimento.

Como (ANDERSON, 2012), transcreve como sendo a quarta revolução industrial, onde o usuário interfere diretamente no desenvolvimento dos produtos aos quais consome, pode-se entender que para o desenvolvimento e principalmente para o êxito de um projeto de aeronave, se faz necessário a interação direta para com os usuários do produto, ensejando assim um contexto totalmente de inovação em meio aos processos de ideação das aeronaves. Com isso, se faz importante ressaltar que os processos propostos e definidos como da quarta revolução industrial, são na verdade ferramentas para aprimoramento dos meios de produção, atualização profissional quanto a importância essencial de um produto e a definição de critérios de design na ideação de uma aeronave, ou seja, o que (ANDERSON, 2012) defende é que os processos de desenvolvimento de um produto se faz por meio da interação entre os stakeholders, porém não havendo a retirada dos processos de engenharia no desenvolvimento dos produtos.

Por meio do uso das ferramentas de prototipagem, é possível no processo de ideação definir o que (JENKINSON, et al., 2003) determina como critérios de projeto, portanto o intuito em aplicar o que (ANDERSON, 2012) determina como movimento *Maker*, é na verdade inserido na interação dos processos de engenharia com os resultados intrínsecos e extrínsecos da aeronave, desde o início do projeto até o processo de manufatura da aeronave, sendo, portanto o movimento *Maker*, conforme (ANDERSON, 2012) um movimento de interação e uma série de ferramentas para se ter um produto com os critérios críticos que são exigidos para o meio aeronáutico como (JENKINSON, et al., 2003) analisa, mas entendendo o que (MASON, 2004) define como a engenharia de desenvolvimento de aeronaves e a interação com o mercado.

Tipicamente um setor de engenharia de desenvolvimento é movido pelas tecnologias as quais são especialidades de cada departamento industrial. As formas como se configuram uma aeronave, e relacionando com as possibilidades de em conjunto com as ferramentas e processos de ideação com ferramentas de design e com o uso de recursos *Maker* (ANDERSON, 2012), seja possível como chegar a uma aproximação de um modelo conceitual e posteriormente um projeto preliminar, que transmite as principais características da aeronave (JENKINSON, et al., 2003). Assim transformando o processo de engenharia convencional em um processo com fluidez e com modelos que denotam ao projeto de aeronaves uma maior taxa de assertividade quanto ao atendimento de demandas de transporte aéreo (MASON, 2004), configurando assim uma engenharia de inovação no meio aeronáutico (JENKINS, et al., 2004).

Com o uso de métodos que possam aproximar as áreas de desenvolvimento, é imprescindível a correta aplicação das tecnologias e métodos de design, onde as ferramentas de prototipagem entram como auxílio nos processos de desenvolvimento em todas as etapas de projetos, sendo utilizadas como ferramentais para uma melhor otimização dos processos, e conseqüentemente das estruturas e conseqüentemente gerando aeronaves com maior possibilidade de acerto com relação a estabilidade e controle (Raymer, 1992).

Diante das modificações decorrentes da evolução tecnológica, junto também se torna evidente a necessidade de evolução nos processos de desenvolvimento das aeronaves, com isso é possível afirmar que conforme a quantidade de ferramentas de prototipagem, conferindo assim uma maior taxa de acerto quanto a melhor aeronave a ser construída (ANDERSON, 2012) e (JENKINSON, et al., 2003).

## **2.2. Projeto Conceitual**

O projeto conceitual é a primeira etapa para o desenvolvimento de uma aeronave, onde são utilizados conceitos e experiências vividas para o

dimensionamento de todas as partes do projeto e se define principalmente as condições para que o avião consiga desempenhar a missão definida no escopo do projeto, também definido no projeto conceitual, transferindo assim uma importância fundamental no que se diz respeito aos requisitos estabelecidos em um processo de desenvolvimento de aeronaves (Raymer, 1992).

No projeto conceitual, é determinado também o detalhamento sobre as condições de estabilidade e controle, de forma a estabelecer modelos matemáticos e resultados que possam contribuir para a análise do desempenho tanto com relação a missão da aeronave quanto sua dinâmica de voo (Raymer, 1992).

### **2.3. Projeto Preliminar**

Definido como a etapa onde os critérios estabelecidos no projeto conceitual passam a um próximo nível de entendimento, onde nessa etapa também são inseridos os critérios referentes a estrutura da aeronave, os possíveis métodos de fabricação e técnicas a serem aplicadas, de forma a gerar um produto já pré-definido, com diversas características de construção já estabelecidas e principalmente com uma grande parte dos conceitos sobre os níveis de desempenho da aeronave de alguma forma, já otimizados (JENKINSON, et al., 2003).

Também é determinada nessa etapa uma série de fatores que possam contribuir para um protótipo, seja por meio de simulação computadorizada, ou por meio de um protótipo prático determinações práticas quanto a dinâmica de voo (Raymer, 1992).

### **2.4. Impressão 3D**

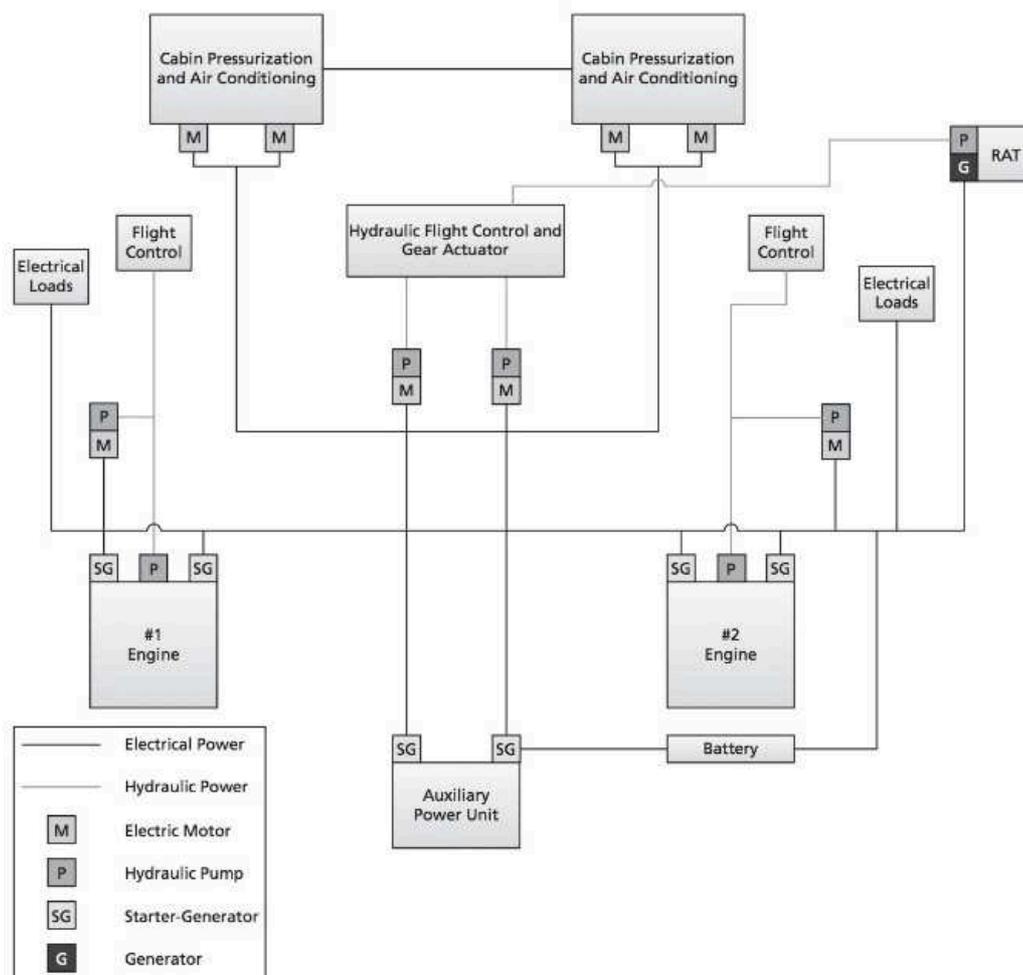
A impressão 3D é uma técnica baseada na utilização do plano x, plano y e plano z, para a obtenção de um sólido, que possa pertencer a uma construção ou um objeto ao qual possui medidas pré-determinadas por um

software de modelagem que pode ser transcrito em um objeto por meio de tal processo (KELLY, 2014).

Na impressão 3D é utilizado o ABS (Acrilonitrilabutadieno estireno), que é um material com uma densidade compatível para aplicações em prototipagem de dispositivos mecânicos, maquetes e diversas outras aplicações, onde tal material concede uma excelente análise dimensional e dependendo do projeto, até estrutural. Onde o funcionamento desse equipamento se resume basicamente a um conjunto de eixos trabalhando com uma extrusora de forma a controlar a disposição de material em uma placa, que posteriormente por causa da construção de tal equipamento transformado tal material em um objeto tridimensional (KELLY, 2014).

## **2.5. Eletrônica Embarcada**

É composta por um conjunto de equipamentos e dispositivos destinados ao controle de construções destinadas a mobilidade. A eletrônica embarcada depende de circuitos eletroeletrônicos mantidos por uma bateria ou conjunto de baterias cujo objetivo é possuir o maior número de funções em um determinado conjunto de circuitos com uma menor densidade de espaço utilizado (EISMIN, 2016). Para exemplificação de um sistema de eletrônica embarcado é apresentado um diagrama de blocos do sistema eletroeletrônico de um Boeing 787 na Figura 1.



**Figura 1** – Sistema de Distribuição de potência do Boeing 787

Fonte: (EISMIN, 2016)

Os sistemas embarcados em aeronaves são constituídos basicamente por baterias, geradores e dispositivos de controle e automação aeronáutica, que tem o nome dado de sistemas aniônicos, aos quais hoje notoriamente são compostos também por sistemas de alto processamento de informações e por atuadores alta precisão, transcrevendo assim um sistema eletrônico de alto desempenho (EISMIN, 2016).

Os sistemas aviônicos possuem grandes influencia desde o controle e estabilidade da aeronave, até aos sistemas de auxílio aos instrumentos ou a pilotagem (EISMIN, 2016).

## **2.6. Motores Elétricos**

São máquinas que possuem grande aplicação industrial, que tem ganhado notoriedade quanto a possibilidade de aplicação no meio aeronáutico (EISMIN, 2016), é um dispositivo destinado a conversão de energia elétrica em energia mecânica, com o uso de sistemas de controle é possível a geração de empuxo ao utilizar um sistema elétrico eficiente, como é o caso dos motores trifásicos (Chapman, 2005).

Para a aplicação em dispositivos de mobilidade e que são portanto acionados por sistemas de eletrônica embarcada é possível a aplicação tanto de sistemas que utilizam motores como atuadores, como atualmente há iniciativas para a aplicação como sistema de geração de empuxo para a aeronave, portanto podendo gerar condições mais favoráveis quanto ao aproveitamento energético e também tendo um sistema extremamente preciso com relação ao controle e a estabilidade do voo (Chapman, 2005) (EISMIN, 2016).

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Projeto Conceitual**

Nessa etapa do projeto será avaliado os parâmetros de aeronaves treinadoras as quais irão fornecer os valores para análise e dimensionamento da aeronave definida como UPVT-1, a qual será composta por análise de parâmetros conforme metodologia adotada por fabricantes de aeronaves e de forma a gerar um modelo com dimensões para um protótipo construído com a utilização de impressão 3D, a qual deverá possuir uma carga alar, peso de decolagem, peso de aterrissagem e parâmetros de controle e estabilidade definidos pelos fatores determinantes aos requisitos exigidos para tal tipo de aeronave.

Para uma correta aplicação do método foram selecionadas aeronaves com missões semelhantes, pois se trata de uma categoria com alto valores de estabilidade (ANDERSON, 2015), e conseqüentemente aeronaves que dependendo da escolha pode haver divergências quantos aos valores dimensionais.

##### **3.1.1. P-56 paulistinha**

Aeronave treinadora, figura2, fabricada pela empresa Industria aeronáutica Neiva, onde tal aeronave possui semelhanças com a aeronave CAP-4, também chamada de Paulistinha, mas fabricada pela Companhia Aeronáutica Paulista. A principal diferença entre os modelos está na sua envergadura.



**Figura 2 – P56 – Paulistinha**

Fonte: (JRCDMODELS, 2014)

**Tabela 1 – DADOS P-56 PAULISTINHA**

Modelo	Paulistinha P-56
Envergadura (m)	10,8
Área da asa (fabricante) (m <sup>2</sup> )	48,25
AR Calculado (m)	6,39
Razão de aspecto da asa (fabricante) (m)	6,39
Base da Asa (Cr) (m)	1,69
Ponta da Asa (Ct) (m)	1,69
Afilamento (m)	1
b <sub>HT</sub> (m)	2,71
S <sub>HT</sub> (m <sup>2</sup> )	1,74
AR <sub>HT</sub>	4,22
L <sub>HT</sub> (m)	2,41
x fuselagem (m)	4,41
I <sub>HT</sub> (m)	0,55
S <sub>HT</sub> (m <sup>2</sup> )	1,74
C <sub>ma</sub> (m)	1,69
C <sub>HT</sub> (m)	0,14
b <sub>VT</sub> (m)	0,9
S <sub>VT</sub> (m <sup>2</sup> )	0,47
AR <sub>VT</sub>	1,72
L <sub>VT</sub> (m)	3,8
I <sub>VT</sub> (m)	0,86
C <sub>VT</sub> (m)	0,01
a (m)	0,41
Cr <sub>HT</sub> (m)	0,97
Ct <sub>HT</sub> (m)	0,32
λ <sub>HT</sub>	0,33
Cr <sub>VT</sub> (m)	1,32
Ct <sub>VT</sub> (m)	0,6
λ <sub>VT</sub>	0,45

Fonte: (VIDEIRA, 2013)

### 3.1.2. Cessna 172 skyhawk

Aeronave treinadora fabricada pela empresa Cessna, figura 3, possui várias versões, onde a versão Skyhawk a qual é uma variação do modelo 172, tal aeronave é amplamente utilizada para instrução e voos na aviação geral. Portanto é analisado na tabela 2 os parâmetros de tal aeronave.



**Figura 3 – Cessna 172 Skyhawk**

Fonte: (GALLERY, 2011)

**Tabela 2 - Dados Cessna 172 Skyhawk**

Modelo	Cessna 172 Skyhawk
Envergadura (m)	10,97
Área da asa (fabricante) (m <sup>2</sup> )	18,25
AR Calculado (m)	6,39
Razão de aspecto da asa (fabricante) (m)	6,39
Base da Asa (Cr) (m)	1,74
Ponta da Asa (Ct) (m)	1,16
Afilamento (m)	0,67
bht (m)	3,45
SHT (m <sup>2</sup> )	3,73
AR,HT	3,19
LHT (m)	4,49
x fuselagem (m)	4,48
IHT (m)	1
SHT (m <sup>2</sup> )	3,73
Cma (m)	1,47
CHT (m)	0,6
bVT(m)	1,66
SVT (m <sup>2</sup> )	1,93
AR,VT	1,43
LVT (m)	4,49
IVT (m)	1
CVT (m)	0,04
a (m)	0,41
CrHT (m)	1,33
CtHT (m)	0,83
$\lambda$ HT	0,62
CrVT (m)	1,5
CtVT (m)	0,83
$\lambda$ VT	0,56

Fonte:(VIDEIRA, 2013)

### 3.1.3. Parâmetros de projeto

Após o processo de obtenção dos dados de aeronaves com missões e estruturas semelhantes ao desejado para o projeto UPVT-1, é possível a obtenção de um projeto conceitual, ao qual é composta de dimensões pré-determinadas com base nos valores obtidos no processo de levantamento de dados. Com as dimensões definidas é possível criar o projeto conceitual, onde será composto por um modelamento em 3D e por um projeto eletroeletrônico

embarcado, que terá como função controlar as superfícies de comando primárias da aeronave.

Para tal projeto foi proposto uma carga alar baseada na área da asa e no peso estimado a ser embarcado na aeronave, contudo para se gerar um modelamento coerente para com o projeto, deve-se considerar os valores médios encontrados a partir da análise dos parâmetros das aeronaves supramencionadas na figura 2 e figura 3.

Na Tabela 3, são apresentados os valores médios utilizados como base para o projeto conceitual do UPVT-1.

**Tabela 3 – VALORES MÉDIOS – PARÂMETROS COMPARATIVOS**

Modelo	MÉDIA
Envergadura (m)	10,89
Área da asa (fabricante) (m <sup>2</sup> )	18,68
AR Calculado (m)	6,35
Razão de aspecto da asa (fabricante) (m)	6,35
Base da Asa (Cr) (m)	1,72
Ponta da Asa (Ct) (m)	1,43
Afilamento (m)	0,83
bht (m)	3,08
SHT (m <sup>2</sup> )	2,73
AR,HT	3,71
LHT (m)	3,45
x fuselagem (m)	4,45
IHT (m)	0,77
SHT (m <sup>2</sup> )	2,73
Cma (m)	1,58
CHT (m)	0,37
bVT(m)	1,28
SVT (m <sup>2</sup> )	1,2
AR,VT	1,58
LVT (m)	4,15
IVT (m)	0,93
CVT (m)	0,03
a (m)	0,41
CrHT (m)	1,15
CtHT (m)	0,58
$\lambda$ HT	0,48
CrVT (m)	1,41
CtVT (m)	0,72
$\lambda$ VT	0,5

**Fonte:** (Própria, 2017)

A partir da observância dos valores obtidos e descritos na tabela 3, tem-se então os valores referenciais para o desenvolvimento coerente para com as aeronaves treinadoras, no desenvolvimento do projeto conceitual do UPVT – 1, onde é considerado os valores contidos na tabela 3, para se conceber um projeto coerente para com a missão a ser desempenhada pela aeronave.

No projeto conceitual, com base nos equipamentos embarcados e na motorização, é determinado os parâmetros dimensionais da aeronave, de acordo com os valores contidos na tabela 4.

**Tabela 4 – Parâmetros Dimensionais Da Aeronave UPVT– 1**

b	200 mm
ct	29 mm
cr	34 mm
xfus	82 mm
bht	65 mm
ctht	11 mm
crht	24 mm
bvt	26 mm
ctvt	11 mm
crvt	22 mm

Fonte: (Própria, 2017)

Os valores dados na tabela 4 transcrevem ao projeto UPVT-1 as dimensões necessárias para as características relacionadas a controle e estabilidade da aeronave e conseqüentemente em relação a capacidade da aeronave desempenhar um voo.

### **3.2. Projeto Elétrico**

Equipamentos e dispositivos para o funcionamento do motor principal da aeronave e controle das superfícies de comando da aeronave, sendo composto por sistemas eletroeletrônicos, onde são utilizados tais componentes para atendimento das necessidades de atuação da aeronave.

### 3.2.1. Motor elétrico trifásico aplicado a aeronaves

Os Motores elétricos são máquinas que convertem a energia elétrica e energia mecânica, de forma a gerar torque em um eixo que é acoplado os dispositivos, no intuito de gerar um momento girante (Chapman, 2005), ou como é aplicado na aviação modelista para a geração de empuxo para a aeronave por meio de uma hélice.

Os motores trifásicos são utilizados para geração de empuxo em aeronaves por possuir uma estrutura relativamente pequena em relação a sistemas mecânicos, ou seja, possui maior aplicabilidade quando se trata de desenvolvimento de aeronaves aplicadas em prototipagem ou em aeromodelismo. O nome dado aos motores de tal categoria aplicados a aeromodelismo é de motor brushless.

### 3.2.2. Levantamento de dados do motor elétrico

Para se determinar o Sistema de fornecimento e manutenção da energia do Sistema eletroeletrônico da aeronave, foi realizado um teste com todos os sistemas em funcionamento, onde o principal era a obtenção coerente do fluxo de energia necessário para manter o motor principal em funcionamento. O motor utilizado no UPVT – 1 foi um modelo de motor trifásico com valores em relação aos seus parâmetros por meio do equacionamento abaixo (Equação 1)

$$P_{motor} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot FP \cdot \eta \text{Eq. 1}$$

Onde:

V – É a tensão de alimentação do motor, ao qual depende diretamente do driver de alimentação e controle, que no caso do projeto foi utilizado um driver com saída de 5V em corrente alternada, mostrado na Figura 4.



Figura 4 – Driver de controle do Motor Principal Trifásico

Fonte: (Própria, 2017)

I – É a corrente, obtida de forma experimental, utilizando o método de mediação de corrente trifásica utilizando um alicate amperímetro, Figura 5, onde se a partir de tal medição é possível determinar a corrente que o motor consome, e conseqüentemente calcular a potência do motor.



**Figura 5** – Amperímetro Alicate

Fonte: (Própria, 2017)

FP – É o fator de potência, que é a relação angular entre a potência ativa, ou potência útil, e a potência reativa, que comumente é atribuído para motores uma relação média de 0,8 (Chapman, 2005).

$\eta$  – É o rendimento do motor, que é a relação entre a energia a qual o alimenta e a energia a qual é convertida, sendo em média atribuído para motores desse tipo o valor de 0,9 (90%) (Chapman, 2005).

Ao realizar os ensaios com o alicate amperímetro foi constatado uma corrente consumida pelo motor de 350mA, esse valor aplicando a Equação 1, tem-se uma potência definida conforme a Equação 2.

$$P_{motor} = \sqrt{3} \cdot 5 \cdot 0,350 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 2,182W \text{ Eq. 2}$$

Com a potência do motor principal definida, é possível determinar a carga da bateria a ser utilizada para o mate-lo em funcionamento.

Diante do exposto, pode-se adotar um acréscimo de 100mA para a alimentação do sistema de rádio frequência e para a alimentação dos Servo motores aplicados as superfícies de comando, onde para tal determinação é utilizado o datasheet do Servo motor modelo SG90 (Anexo 1).

Com os dados definidos e os valores de potência solicitadas dos motores é possível definir uma bateria mínima para manter o sistema em funcionamento, diante disso foi definida uma carga mínima da bateria de 450mA, onde para baterias é determinado como capacidade em corrente po hora, portanto é determinada uma bateria de 450mA/h. Com o intuito de se alimentar todos os dispositivos, é necessário alimentar o sistema com uma bateria com tensão superior a tensão de 5V, por isso se faz necessária a utilização de uma tensão elétrica superior a tal valor, com tais observações é definida a tensão de 9V, que é uma tensão de uma bateria comercial, sendo possível a utilização de valor superior a tal tensão, porém sendo necessário observar o valor de tensão de alimentação do driver do motor.

Ao ponto que se definiu a carga mínima da bateria é possível determinar o consumo total do sistema, onde é utilizada a Equação 3 para isso.

$$P_{Bateria} = V_{Bateria} \cdot I_{TOTAL} = 9 \cdot 0,450 = 4,05W \text{ Eq. 3}$$

A partir do valor obtido na Equação 3, pode-se observar que para o atendimento do circuito eletroeletrônico da aeronave é aplicada uma potência

mínima da bateria de 4,05W, podendo ser acrescida mais baterias conforme a necessidade da aeronave, com tal situação é definido os valores mínimos a serem aplicados. A bateria comercialmente aplicada é mostrada na Figura 6.



**Figura 6** – Bateria de 9V e 450mA/h definida para o UPVT -1

Fonte: (Própria,2017)

### **3.3. Projeto Final**

#### **3.3.1. Perfil aerodinâmico**

Com as dimensões definidas e o projeto eletroeletrônico determinado é possível definir os parâmetros para a modelagem 3D, a qual é desenvolvida com o uso do Solidworks ou Inventor, aos quais como softwares de modelagem podem ser transcrever ao modelo todas as dimensões do projeto conceitual, concedendo ao projeto todas as dimensões necessárias.

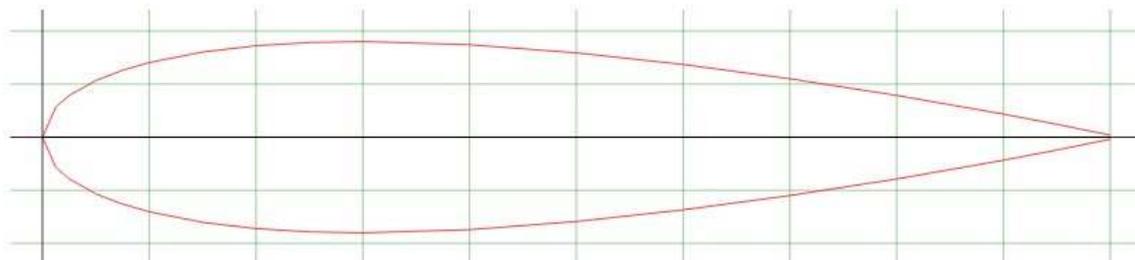
Para conceber ao modelo referente ao projeto UPVT-1 capacidades aerodinâmicas, foi determinado o perfil NACA 0018, ao qual suas coordenadas estão contidas na Tabela 5.

**Tabela 5 – Coordenadas X e Y Perfil NACA 0018**

PERFIL SIMÉTRICO NACA 0018			
X	Y	X	Y
1	0,00189	0,0125	-0,02841
0,95	0,0121	0,025	-0,03922
0,9	0,02172	0,05	-0,05332
0,8	0,03935	0,075	-0,063
0,7	0,05496	0,1	-0,07024
0,6	0,06845	0,15	-0,08018
0,5	0,07941	0,2	-0,08606
0,4	0,08705	0,25	-0,08912
0,3	0,09003	0,3	-0,09003
0,25	0,08912	0,4	-0,08705
0,2	0,08606	0,5	-0,07941
0,15	0,08018	0,6	-0,06845
0,1	0,07024	0,7	-0,05496
0,075	0,063	0,8	-0,03935
0,05	0,05332	0,9	-0,02172
0,025	0,03922	0,95	-0,0121
0,0125	0,02841	1	-0,00189
0	0	0,0125	-0,02841

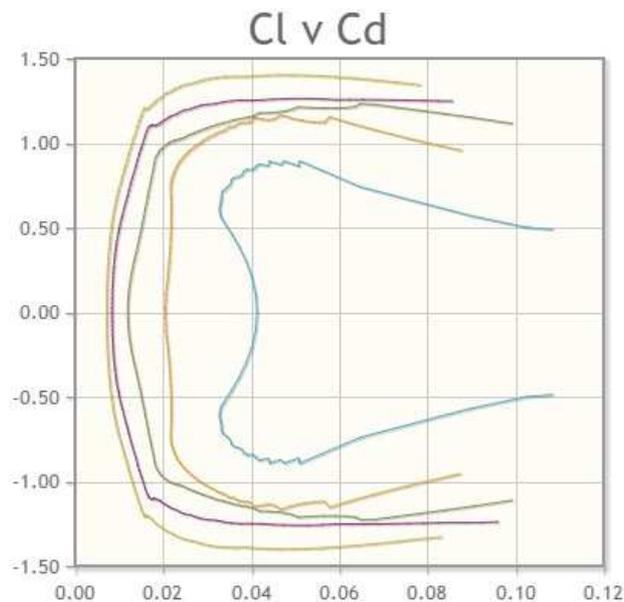
Fonte: (AIRFOILTOOLS, 2017)

O perfil Naca 0018, tem por característica ser um perfil simétrico, ao qual possui aplicação em diversos modelos de aeronaves do tipo treinadora (ANDERSON, 2015), na Figura 7 é mostrado o esboço do perfil Naca 0018.

**Figura 7 – Perfil Naca 0018**

Fonte: (AIRFOILTOOLS, 2017)

Com os valores aerodinâmicos de tal perfil definidos pelos gráficos obtidos em ensaios conforme a Figura 8, a qual demonstra a relação dos coeficientes aerodinâmicos e suas interações.



**Figura 8** – Relação dos Coeficientes Aerodinâmicos Perfil Naca 0018

Fonte: (AIRFOILTOOLS, 2017)

### 3.3.2. Modelagem 3D

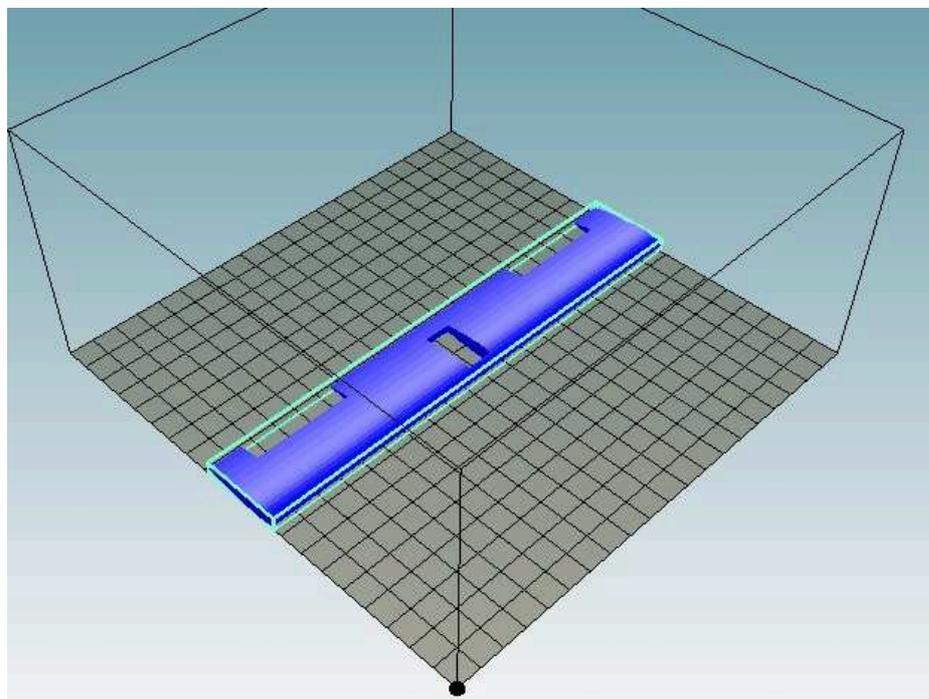
Com o intuito de aplicar as técnicas de modelagem 3D, utiliza-se a aplicação de softwares de modelagens, como Solidworks ou Inventor, como supracitado anteriormente, com isso podendo aplicar não só o dimensionamento adequado, mas também aplicando o correto dimensionamento do perfil aerodinâmico definido, para que a aeronave possa desempenhar um voo coerente para com o projeto conceitual.

### 3.3.3. Prototipagem

O processo de prototipagem rápida aplicado ao modelo físico do UPVT - 1 é baseado na utilização da tecnologia de impressão 3D, onde foi utilizado o modelamento 3D como base para a geração do protótipo.

O protótipo do UPVT – 1 desenvolvido foi o modelo utilizando o material ABS, ao qual tem como característica a estrutura física modelada no processo de modelamento 3D, com tal modelamento desenvolvido é necessário a geração de um arquivo composto por um tipo de modelo 3D que possibilite a leitura de um software específico, no caso o software utilizado para tal função é o Repetier, para integração entre o computador e a impressora 3D.

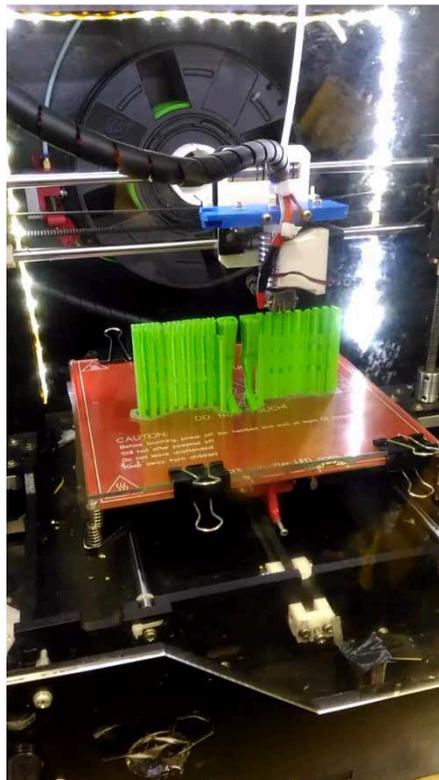
Ao aplicar o modelamento 3D no software Repetier o arquivo é transcrito para uma linguagem de máquina a qual é possível correlacionar ponto a ponto cada parte do modelamento e assim agregando todas as características do projeto de engenharia aeronáutica desenvolvido. Um modelamento feito em sistema descrito, é mostrado na figura 9.



**Figura 9 – Asa do UPVT – 1 configurado para Impressão 3D**

Fonte: (Própria, 2017)

Após a geração do modelo 3D é transformado o dispositivo em um sistema de coordenadas, ao qual é transferido a impressora 3D, gerando assim um código de máquina ao qual é feito assim a produção do modelo. Um exemplo de como é transformado o modelo projetado em 3D, um modelo real é produzido, assim gerando todas as características definidas pelo processo de ideação e projetos realizados e transcritos no modelo, sendo apresentado na Figura 10.



**Figura 10 – Impressão 3D**

Fonte: (Própria, 2017)

Diante do processo acima descrito tem-se então um resultado como definido no escopo do projeto, sendo possível a aplicação de métodos de testes das estruturas ou então acrescentar a eletrônica embarcada no modelo impresso, possibilitando a capacidade de voo e assim podendo realizar análises quanto as atitudes da aeronave em voo e também aplicando métodos de análises de estabilidade e controle, gerando assim um modelo real para

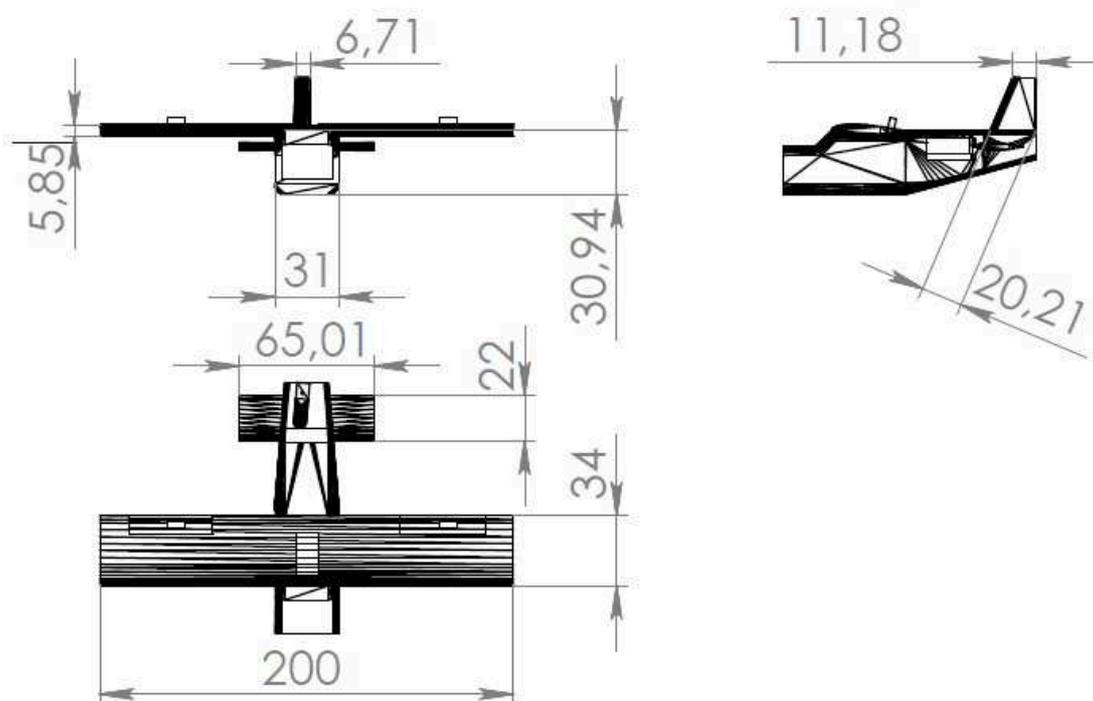
análise de diversos fatores relacionados ao desenvolvimento de uma aeronave. Conforme supramencionado, é possível portanto desenvolver um processo de otimização de projetos por meio da aplicação de tal método.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Projeto Conceitual

Tendo como objetivo o desenvolvimento de um modelo que desempenhe voo utilizando para a construção a impressão 3D, com isso aplicando possíveis melhorias ao ponto que tal modelo pode sofrer maior adaptação conforme as análises de desempenho e controle, portando para o desenvolvimento do modelo UPVT – 1 é definido como um modelo que possa desenvolver um voo de acordo com o projeto conceitual.

Diante dos valores obtidos por meio do uso do projeto conceitual, foi definido os valores para o desenvolvimento do modelo na Figura 10, sendo demonstrado por meio do modelo 3 vistas.

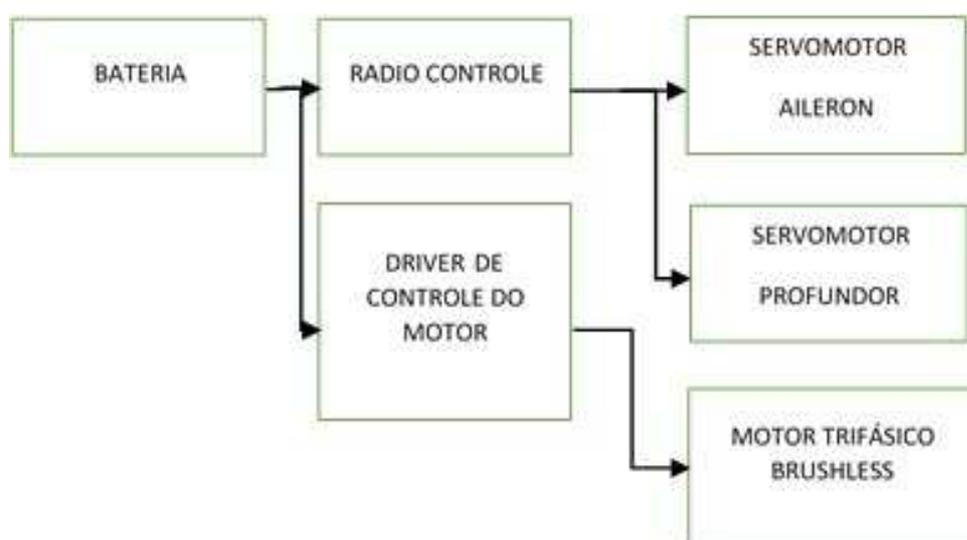


**Figura 11**– Modelo 3 Vistas UPVT-1

Fonte: (Própria, 2017)

## 4.2. Projeto Elétrico

O sistema eletroeletrônico da aeronave segue o fluxo apresentado na Figura 12, onde é possível o entendimento quanto ao funcionamento total do sistema de controle da aeronave, sendo configurado tal sistema para ser controlado por meio da aplicação de um rádio controle, conforme Figura 13.



**Figura 12** – Fluxo do Sistema eletroeletrônico do UPVT -1

Fonte: (Própria, 2017)



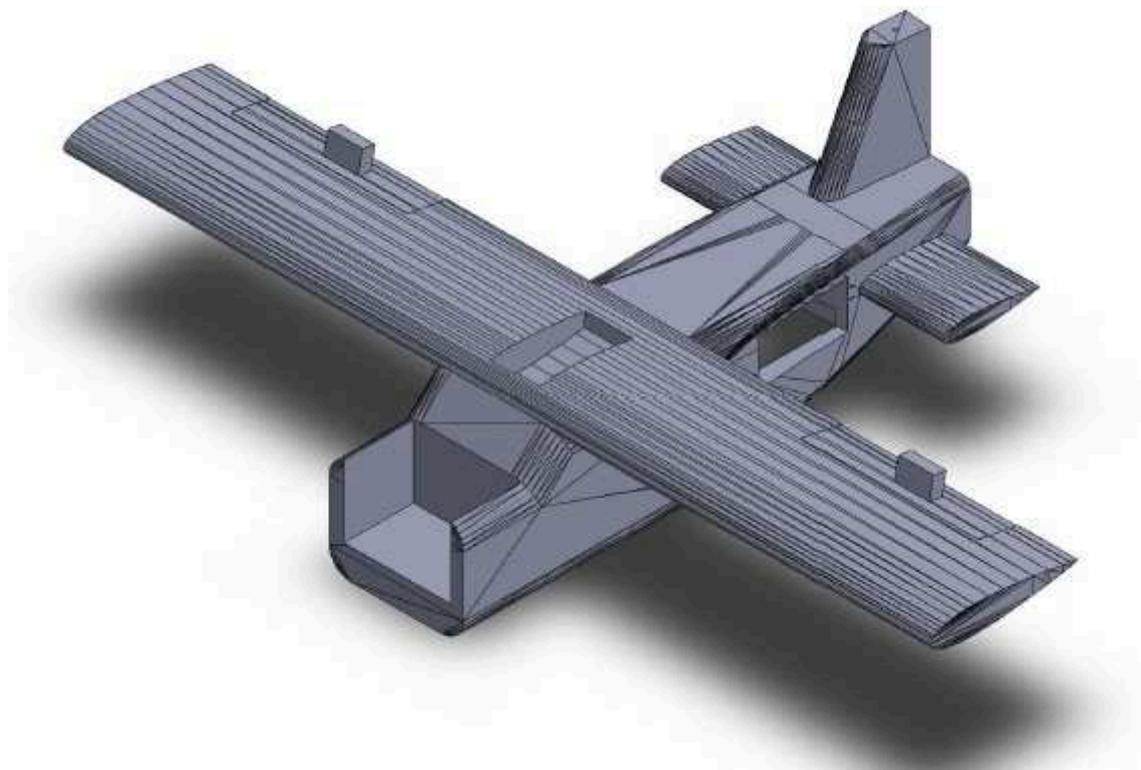
**Figura 13** – Rádio controle Futaba utilizado no Projeto UPVT – 1

Fonte: (Própria, 2017)

### 4.3. Protótipo Final

O modelo final desenvolvido é apresentado na Figura 13, ao qual possui as características de toda a aeronave e suas características construtivas da aeronave modelo UPVT – 1.

Com o modelo apresentado na Figura 14, é possível o desenvolvimento a partir do modelamento 3D, ao qual utilizando uma conversão de arquivo para o modelo compatível com a aplicação em impressão 3D.

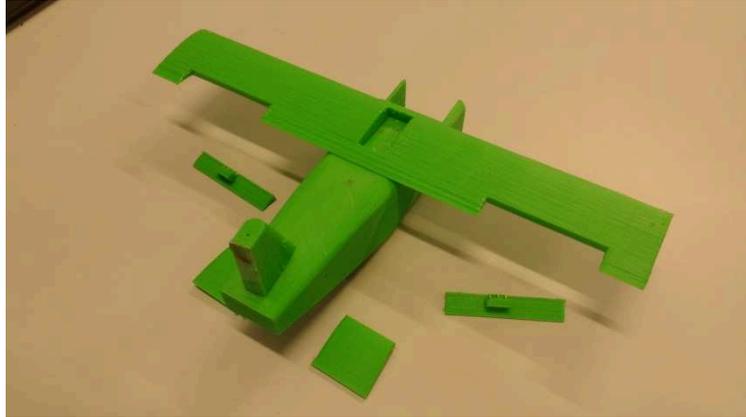


**Figura 14** – Modelo 3D

Fonte: (Própria,2017)

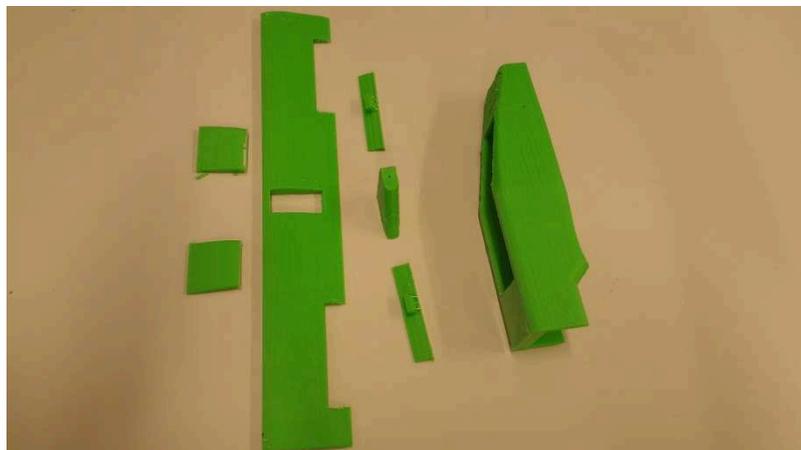
Após a definição do modelo demonstrado na figura 14, é realizada a impressão das peças mostradas na figura 15 e na figura 16, sendo assim o protótipo do modelo UPVT – 1, ao qual poderá passar por um processo de análise e conseqüentemente também passar por um processo de agregar a estrutura um sistema de eletrônica embarcada e de rádio controle, conseguindo

assim a realização de voos para testes ou de análises de atitudes, por consequência análise de estabilidade e controle.



**Figura 15 – Vista da Pré-Montagem do Protótipo do UPVT – 1**

Fonte: (Própria, 2017)



**Figura 16 – Vista das peças Impressas do Protótipo do UPVT – 1**

Fonte: (Próprio, 2017)

A partir das peças impressas, é realizada a montagem das peças que compõem a aeronave, de forma a qual aliada as ferramentas de prototipagem rápida e alinhando com as metodologias de projetos de aeronaves é possível

agregar grande valia, no desenvolvimento de aeronaves, no que diz respeito ao ganho de tempo em relação ao método tradicional, isso se dá pelo rápido aprendizado sobre as iterações com que o projeto pode sofrer e os estudos que estão relacionados a atuação das superfícies de comando.

## 5. CONCLUSÃO

Diante do objetivo de desenvolver uma aeronave a partir da utilização de tecnologias de prototipagem rápida, foi alcançado tal tarefa, de forma a propor por meio deste trabalho um processo para otimizar o método de desenvolvimento de uma aeronave embasado em uma consolidada revisão literária, com isso obtendo um protótipo possível de ser aplicado e consideravelmente integrando a sistemas eletroeletrônicos e radio controles, possível de transcrever atitudes coerentes em voo.

Para agregar maior valor quanto ao trabalho é possível o desenvolvimento de análises de controle e estabilidade da aeronave prototipada e conseqüentemente aprimorar os dispositivos aplicados e estruturas construídas, além de poder agregar outros tipos de materiais a impressão 3D.

## BIBLIOGRAFIA

**AIRFOILTOOLS.** 2017. Perfil Naca 0018. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>. [Online] Airfoil Tools, 2017.

**ANDERSON, CHRIS.** 2012. *MAKERS - THE NEW INDUSTRIAL REVOLUTION*. BERKELEY : CROWN BUSINESS, 2012.

**ANDERSON, JOHN D.** 2015. *FUNDAMENTOS DE ENGENHARIA AERONÁUTICA 7ed*. PORTO ALEGRE : MC GRAW HILL, 2015.

**Chapman, Stephen J.** 2005. *Electric Machinery Fundamentals*. New York : MCGRAW-HILL, 2005.

**EISMIN, THOMAS K.** 2016. *ELETRÔNICA DE AERONAVES - INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS AVIÔNICOS*. ESTADOS UNIDOS : s.n., 2016.

**GALLERY, AIRPLANES.** 2011. <http://www.airplanesgallery.com/cessna-172-skyhawk/>. 2011.

**JENKINS, MICHAELW. and EBERHARDT, SCOTT.** 2004. *AERONAUTICAL AND ASTRONAUTICAL ENGINEERS*. s.l. : MCGRAW-HILL, 2004.

**JENKINSON, LLOYD R. and III, JAMES F. MARCHMAN.** 2003. *AIRCRAFT DESIGN PROJECTS*. Burlington : Oxford, 2003.

**JRCMODELS.** 2014. <http://www.jrcmodels.com.au/magento/index.php/sport-scale/paulistinha-p-56.html>. 2014.

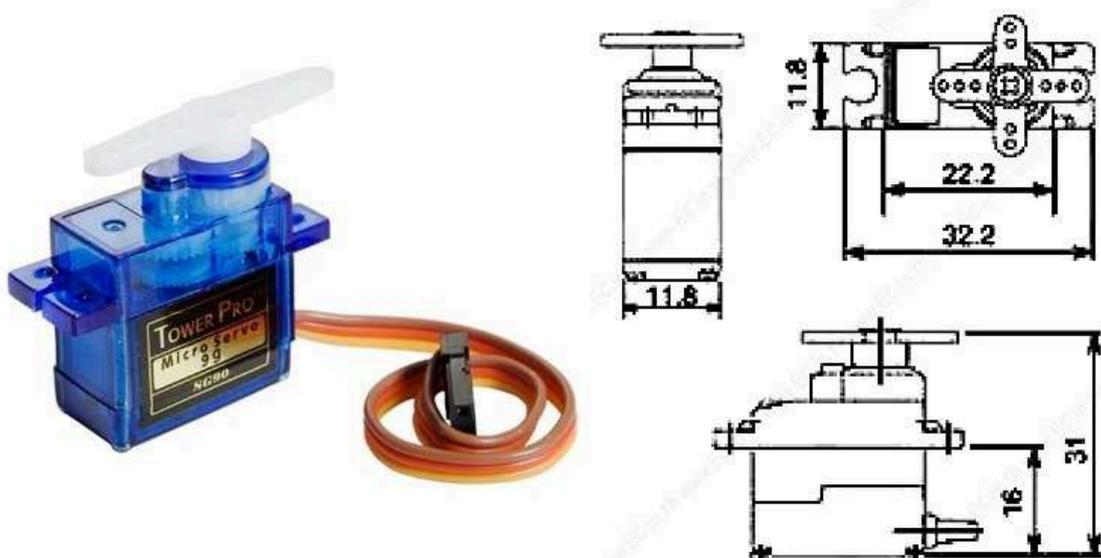
**KELLY, JAMES FLOYD.** 2014. *3D Printing: Build Your Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects*. s.l. : PEARSON, 2014.

**MASON, WILLIAM H.** 2004. *TRANSPORTATION ENGINEERING*. VIRGINIA : MCGRAW-HILL, 2004.

**Raymer, Daniel P.** 1992. *AIRCRAFT DESIGN: A CONCEPTUAL APPROACH*. WASHINGTON : AIAA EDUCATION SERIES, 1992.

## ANEXO

# SERVEMOTOR G90g Micro Servo



Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees(90 in each direction), and works just like the standard kinds but *smaller*. You can use anyservo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to makestuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since itwill fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.

## Specifications

Weight: 9 g

Dimension: 22.2 x 11.8 x 31 mm approx.

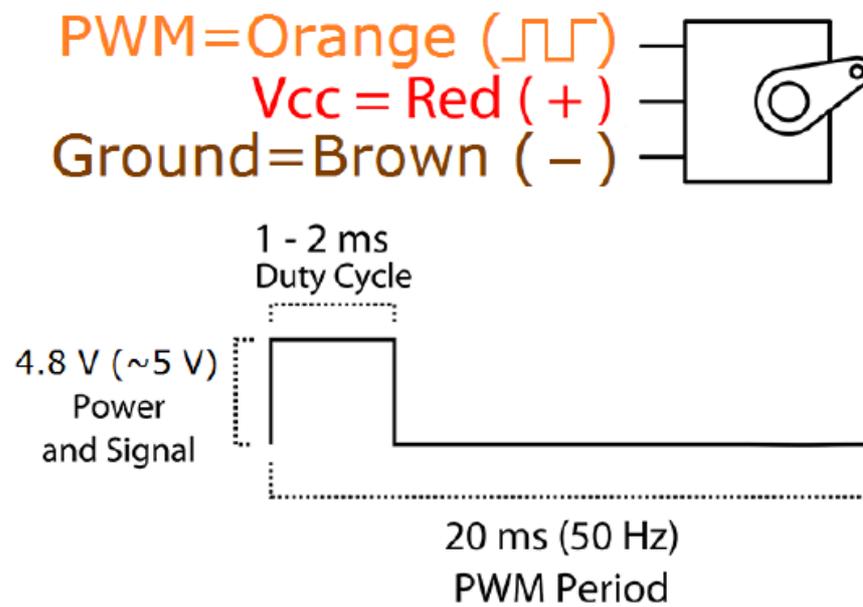
Stall torque: 1.8 kgf·cm

Operating speed: 0.1 s/60 degree

Operating voltage: 4.8 V (~5V)

Dead band width: 10  $\mu$ s

Temperature range: 0°C – 55 °C



Position "0" (1.5 ms pulse) is middle, "90" (~2 ms pulse) is all the way to the right, "-90" (~1 ms pulse) is all the way to the left.