

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA BANCADA DE TESTE
APLICADA À PROPULSÃO AERONÁUTICA HÍBRIDA**

LEONARDO MORANDI DE CASTRO SANTOS

JUIZ DE FORA

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA BANCADA DE TESTE
APLICADA À PROPULSÃO AERONÁUTICA HÍBRIDA**

LEONARDO MORANDI DE CASTRO SANTOS

JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

2018

**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA BANCADA DE TESTE
APLICADA À PROPULSÃO AERONÁUTICA HÍBRIDA**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Área de conhecimento: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

2018

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Morandi, Leonardo.

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA BANCADA DE TESTE
APLICADA À PROPULSÃO AERONÁUTICA HÍBRIDA / LEONARDO
MORANDI DE CASTRO SANTOS. – 2018.

53 f. : il.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Trabalho Final de Curso – UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE
FORA, FACULDADE DE ENGENHARIA. CURSO DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA, 2018.

1. Instrumentação. 2. Propulsão Híbrida. 3. Sensor. I. Marcomini,
Raphael Fortes, orient. II. Título.

**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA BANCADA DE TESTE
APLICADA À PROPULSÃO AERONÁUTICA HÍBRIDA**

LEONARDO MORANDI DE CASTRO SANTOS

Trabalho Final de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com o Artigo 9º do Capítulo IV das Normas de Trabalho Final de Curso estabelecidas pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: 19/06/2018

Por:

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

Prof. Dr. Alexandre da Silva Scari

Prof^a. Dr^a. Yipsy Roque Benito

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me proveu a oportunidade de ir atrás dos meus sonhos e me mostrou diversas vezes o caminho certo.

Aos meus pais, Guilherme e Cláudia, que sempre me deram o suporte necessário para permitir que eu e minha irmã pudéssemos estudar e nos formar. Às minhas avós, Denise e Aparecida, que acreditaram no meu futuro e fizeram de tudo para sempre ajudar no que fosse preciso. À minha irmã, Rachel, que fez seu papel de irmã mais velha e sempre zelou por mim. À minha namorada, Luisa, que sempre escutou sem reclamar todos os problemas que a Engenharia trás em nossa vida pessoal e me proveu suporte para continuar.

Aos meus amigos de turma, do Aerodesign, do intercâmbio que transformaram essa fase da minha vida em um período de muita risada e ao mesmo tempo muito aprendizado e companheirismo. Todos sabem que ninguém forma em Engenharia sozinho.

Ao corpo docente da faculdade de Engenharia Mecânica e de Ciência Exatas da Universidade Federal de Juiz de Fora, ao meu orientador Raphael Marcomini e aos professores Alexandre Scari e Patrícia Habib, pela sua ajuda e paciência durante a elaboração deste trabalho.

”A diferença entre ordinário e extraordinário é esse pequeno 'extra' ”.

Jimmy Johnson

RESUMO

Esse trabalho consiste na seleção da instrumentação para medidas de torque e empuxo em uma bancada de testes de propulsores em um sistema elétrico-híbrido. Os sistemas de propulsão híbridos estão cada dia mais presentes na vida das pessoas principalmente nos países desenvolvidos nas frotas veiculares. Hoje já se tornam promessa para outras aplicações como na indústria aeronáutica em que vários projetos já estão em desenvolvimento. Um sistema de propulsão híbrido é aquele no qual a energia de propulsão é disponibilizada por dois ou mais tipos de fonte e têm como principal benefício minimizar o alto nível de emissão de poluentes. A bancada de instrumentação foi desenvolvida especificamente para o sistema híbrido aeronáutico que conta basicamente com uma turbina aeronáutica junto a um gerador, sistemas eletro-eletrônico, conjunto de baterias e um sistema de propulsão que conta com um motor elétrico e hélice. Os itens foram projetados de acordo com a demanda da bancada em questão utilizando os dados dos possíveis fornecedores.

Palavras-chave: Propulsão aeronáutica híbrida; instrumentação; transdutor de torque; célula de carga; empuxo; torque.

ABSTRACT

This work consists in the selection of the instrumentation for torque and thrust measurements in a test bench of propellers in an electric-hybrid system. Hybrid propulsion systems are increasingly present in people's lives, especially in developed countries in vehicle fleets. Today they already become promise for other applications as in the aeronautical industry in which several projects already are in development. A hybrid propulsion system is one in which propulsion energy is provided by two or more types of source and has as main benefit to minimize the high level of emission of pollutants. The instrumentation bench was developed specifically for the aeronautical hybrid system that basically counts on an aeronautical turbine with a generator, electro-electronic systems, set of batteries and a system of propulsion that counts on an electric motor and propeller. The items were designed according to the demand of the bench in question using the data of the possible suppliers.

Key-words: Hybrid aeronautical propulsion; instrumentation; torque transducer; load cell; buoyancy; torque.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – E-Fan X hybrid-electric aircraft model	14
Figura 2 – Arquitetura de propulsão híbrida com topologia em série	18
Figura 3 – Microturbina a gás	19
Figura 4 – Motor elétrico	20
Figura 5 – Motor elétrico Emrax-188	20
Figura 6 – Configurações de hélices	21
Figura 7 – Características geométricas de hélice	21
Figura 8 – Aerofólios da pá da hélice	22
Figura 9 – Esquema ilustrativo sobre transdutores	23
Figura 10 – Transdutor de torque de eixo circular	27
Figura 11 – Tipologias dos acoplamentos mecânicos	30
Figura 12 – Acoplamentos mecânicos	31
Figura 13 – Relação de potência e torque em relação à rotação	38
Figura 14 – Célula de carga U3 (2 <i>kN</i>).	44
Figura 15 – Transdutor de torque T22 (500 <i>N.m</i>).	46
Figura 16 – Acoplamento mecânico não-elástico ADS	49
Figura 17 – Bancada de instrumentação completa	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação dos tipos de células de carga	26
Tabela 2 – Informações do motor Emrax-228	34
Tabela 3 – Tabela para cálculo do momento no acoplamento	41
Tabela 4 – Resultados da força de empuxo estático teórico	43
Tabela 5 – Dimensões célula de carga U3	45
Tabela 6 – Características célula de carga U3	45
Tabela 7 – Resultados do torque no eixo do motor	46
Tabela 8 – Características transdutor de torque T22	47
Tabela 9 – Dimensões transdutor de torque T22	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATAG	<i>Air Transport Action Group</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFD	Computer Fluid Dynamics
CLP	Controlador Lógico Programável
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
ITA	<i>Instituto Tecnológico de Aeronáutica</i>
MCI	Motor a Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
NTEP	<i>Nexo Técnico Epidemiológico Previdenciário</i>
OIML	<i>Organização Internacional de Metrologia Legal</i>
SG	Strain Gages

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Diâmetro da Hélice
M_D	Momento
n	Velocidade Rotacional
ω	Velocidade Angular
P	Potência
p	Passo da Hélice
T_0	Empuxo estático

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA	13
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.3	MOTIVAÇÃO	14
1.4	OBJETIVOS	15
1.4.1	Objetivo Geral	15
1.4.2	Objetivos Específicos	15
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	APRESENTAÇÃO DO TEMA	17
2.2	PROPULSÃO ELÉTRICA-HÍBRIDA	17
2.2.1	Grupo Motopropulsor	18
2.2.1.1	Turbina a Gás	18
2.2.1.2	Gerador Elétrico	19
2.2.1.3	Motor Elétrico	19
2.2.1.4	Hélice	20
2.2.2	Baterias	23
2.2.3	Transdutores e Sensores	23
2.2.3.1	Transdutor de Força	24
2.2.3.2	Transdutor de Torque	26
2.2.4	Acoplamentos Mecânicos	29
3	COMPONENTES DA BANCADA DE INSTRUMENTAÇÃO	32
3.1	MICROTURBINA CAPSTONE C30	32
3.2	MOTOR ELÉTRICO EMRAX 228	33
3.3	TRANSDUTOR DE FORÇA	34
3.3.1	Empuxo Estático Máximo	35
3.3.2	Tipologia	36
3.3.3	Especificações Básicas	36
3.4	TRANSDUTOR DE TORQUE	37
3.4.1	Torque máximo	37
3.4.2	Tipologia	39
3.4.3	Especificações Básicas	39
3.5	Acoplamento	40

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Sensor de Força	43
4.2	Sensor de Torque	45
4.3	Acoplamento	48
4.4	Funcionamento conjunto da Bancada	50
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

A finalidade desse projeto é demonstrar a metodologia envolvida na escolha dos itens de instrumentação de uma bancada de teste de um grupo propulsor híbrido composto, principalmente por turbina a combustão interna, gerador elétrico, motor elétrico e hélice e baterias.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao redor do mundo, é notória a crescente importância do mercado de recursos energéticos abrangendo a conscientização de emissão de poluentes, a inovação junto aos biocombustíveis e a preocupação com a melhora na eficiência energética dos meios de transporte em geral. Esse fato pode ser percebido com o crescente mercado de mobilidade elétrica e elétrica-híbrida que compreende os automóveis totalmente elétricos, automóveis híbridos e os aviões elétricos que marcaram os últimos anos com projetos inovadores. Como consequência, essa tecnologia possibilitou a obtenção de automóveis energeticamente mais eficientes e ecologicamente satisfatórios.

A indústria da aviação é responsável pela emissão de 12% de CO_2 para a atmosfera em relação a todos os meios de transporte de acordo com a Air Transport Action Group ATAG (2016). Além disso, 80% de toda emissão de CO_2 é derivada de voos com distância percorrida abaixo de 1500 km. Alternativamente, aeronaves elétricas e elétricas-híbridas apresentam hoje o principal foco de pesquisa para o futuro do meio de transporte aeronáutico no mundo. Contudo, as aeronaves elétricas ainda apresentam certa limitação quanto à autonomia de voo o que não possibilita viagens em distâncias comercialmente satisfatórias para atender o mercado. Assim, acredita-se que as aeronaves híbridas são a saída para alcançar a melhor relação entre autonomia e desempenho energético.

Por definição, um sistema de propulsão híbrido é aquele no qual a energia de propulsão é disponibilizada por dois ou mais tipos de fonte de acordo com Husain (2003). Essa tecnologia pretende interagir as características vantajosas do motor a combustão interna (MCI) e do motor elétrico (ME). Dentre as características que contribuem para a maior eficiência desse sistema, está o menor dimensionamento do MCI é o fator que mais se destaca. Nesse sistema, em um ponto de maior esforço propulsivo, as baterias auxiliam o MCI que alimenta o gerador na alimentação do ME possibilitando um motor a combustão interna de menor potência máxima disponível e assim um motor de menor tamanho e peso.

O sistema de propulsão elétrica-híbrida visa minimizar principalmente três problemas do sistema de propulsão aeronáutico tradicional, são eles: alto nível de emissão de poluentes, grande consumo de combustível e alto nível de ruídos. O maior desafio está na baixa densidade de energia que as baterias oferecem, porém segundo projeções das maiores companhias da área poderemos ter aviões com configuração elétrica-híbrida a partir de 2030.

1.3 MOTIVAÇÃO

Ao redor do mundo, importantes nomes no ramo aeronáutico anunciaram nos últimos anos o extremo interesse no mercado de propulsão híbrida para aviões de médio e grande porte. Já é fato que o sistema de motorização elétrica-híbrida compreende o futuro da mobilidade mundial, dessa maneira diversos centros de pesquisa estão recebendo recursos para o desenvolvimento dessa tecnologia.

O tema apresenta tanta relevância que motivou empresas como Airbus, Rolls-Royce e Siemes a se unirem para o desenvolvimento do modelo de aeronave "E-Fan X" que promete testes experimentais de voo para o ano de 2020 de acordo com Airbus (2017). A Figura 1 abaixo apresenta a imagem modelo do projeto.



Figura 1 – E-Fan X hybrid-electric aircraft model

Fonte: Airbus (2017)

Esse projeto irá explorar as dificuldades do sistema de propulsão assim como efeitos de temperatura, potência elétrica, altitude e os efeitos dinâmicos nos sistemas elétricos e eletromagnéticos.

Devido à grande demanda de estudo desse novo modelo propulsivo, o projeto de uma bancada de instrumentação para aquisição de dados experimentais é essencial para avaliar as melhorias do sistema. A utilização desta bancada possibilitará o monitoramento de variáveis como torque disponível no eixo do motor elétrico, rotação do eixo e força de tração disponível do grupo propulsor. Esses dados possibilitam diversos estudos para a avaliação do sistema de propulsão elétrica-híbrida como estudo de modelos ideais de hélice para cada missão de voo e suas curvas características, resposta do grupo motor com a variação de combustíveis e desempenho do grupo propulsor.

O desenvolvimento desse estudo é baseado na proposta do grupo de pesquisa "GCEME" que tem o objetivo de planejar, projetar, construir e instalar um banco de ensaios para propulsão aeronáutica híbrida turboelétrica em configuração série para o estabelecimento de uma base de conhecimentos multidisciplinar das diversas áreas envolvidas. O grupo abrange professores e estudantes dos departamentos de engenharia elétrica e mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral a escolha dos dispositivos de instrumentação a serem utilizados em uma bancada de medição que visa analisar os parâmetros de desempenho de uma bancada de propulsão híbrida elétrica em configuração série para o meio aeronáutico.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Seleção do transdutor de torque
- Seleção do transdutor de força
- Seleção da tipologia do acoplamento entre o sensor de torque e o eixo motor

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O Capítulo 2 traz uma revisão de literatura, abordando a definição de alguns conceitos essenciais para viabilizar o entendimento do método e a descrição de estudos anteriores pertinentes ao tema.

O Capítulo 3 apresenta os métodos utilizados neste trabalho, quando são descritas as especificações técnicas dos componentes presentes na bancada, além da descrição de suas aplicações.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos métodos de seleção dos componentes da bancada de instrumentação junto a escolha de cada sensor e suas respectivas justificativas.

O Capítulo 5 traz as conclusões inferidas a partir dos resultados obtidos e analisa possibilidades de expansão deste tema em futuros trabalhos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

Por definição, de acordo com NAIT (2017), instrumentação é a ciência que estuda e aplica instrumentos de medição e controle de processos. A principal aplicação de instrumentação compreende os processos industriais, em que é necessário o controle e a medição dos parâmetros físicos e químicos que um determinado projeto necessita.

Inicialmente, os indicadores e o controle dos processos eram monitorados pelos operadores. Contudo, as linhas de controle passaram a ser automatizadas com o surgimento dos instrumentos pneumáticos na década de 1940. Com o avanço da tecnologia e principalmente da eletrônica, a construção de instrumentos eletrônicos substituíram em grande parte os elementos pneumáticos. Devido ao surgimento da computação, ocorreu maior evolução da instrumentação alavancada também pela maior complexidade dos processos industriais e das malhas de controle.

A instrumentação, compreende uma gama de dispositivos que são utilizados para medir principalmente os parâmetros de pressão, temperatura, vazão, condutividade, corrente elétrica, tensão elétrica, vibração mecânica e viscosidade. O instrumento de medida pode ser considerado simplesmente como um dispositivo que ao receber um estímulo na entrada, produz uma saída. Entre os instrumentos de medidas mais utilizados estão os transdutores que compreendem os sensores de torque, rotação e força, que terão grande importância no desenvolvimento desse projeto.

2.2 PROPULSÃO ELÉTRICA-HÍBRIDA

Com objetivo de familiarizar a proposta discutida neste projeto, serão apresentados nessa sessão os principais conceitos base para o completo entendimento da metodologia de escolha dos elementos que compõem a bancada de teste do grupo moto propulsor eletrônico-híbrido.

Existem diversas maneiras de se combinar as fontes de energia referente à aplicação no sistema de propulsão híbrida-elétrica. Dentre elas estão as topologias híbridas em série, em paralelo, em série-paralelo e a híbrida complexa de acordo com Emadi. (2004).

Para o projeto em questão, foi determinado a topologia em série, conforme apresentado na Figura 2.

Nessa arquitetura, somente o motor elétrico guia a hélice, sendo assim toda a potência mecânica gerada pelo motor a combustão interna (MCI) é convertida em potência elétrica por um gerador elétrico acoplado na parte traseira da turbina.

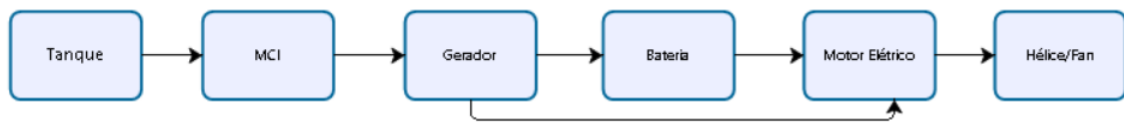


Figura 2 – Arquitetura de propulsão híbrida com topologia em série

Fonte: Almeida (2017)

A principal vantagem de se utilizar esse modelo de propulsão híbrida é a simplicidade do sistema de controle, além disso o desacoplamento do motor elétrico (ME) do eixo do MCI evita variações de carga que a aeronave sofre. Dessa maneira, o ME pode operar sempre no ponto de máximo rendimento.

O sistema elétrico híbrido em questão é formado basicamente por motores (MCI e ME), gerador, baterias e hélice. Os tópicos a seguir trataram de explicar o funcionamento e a aplicação desses componentes no projeto aqui tratado.

2.2.1 Grupo Motopropulsor

2.2.1.1 Turbina a Gás

A turbina a gás é um tipo de MCI e pode ser visto como um conversor de energia em que se transforma energia contida no combustível em energia mecânica sob a forma de potência de rotação de acordo com Head (2011).

O termo em questão faz referencia ao conjunto de basicamente três componentes: compressor, câmara de combustão e a turbina propriamente dita. A Figura 3 apresenta um esquema ilustrativo de uma micro turbina a gás.

Esta configuração tem como base de operação o ciclo termodinâmico *Brayton*, um ciclo aberto. O ar é admitido na pressão atmosférica e os gases de escape, após passarem pela turbina, são descarregados de volta na atmosfera sem que retornem à admissão. Utiliza-se combustíveis gasosos como gás natural, gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás de síntese ou também líquidos como querosene e óleo diesel.

Para o projeto em questão, foi selecionada a Micro Turbina a Gás *Capstone C30 MicroTurbine Generator* como apresentado em Microturbine (2017). É um sistema compacto, possui níveis extremamente baixos de emissão e proporciona até 30 kW de potência. Compreende um compressor centrífugo, recuperador tipo anular integral, câmara de combustão, turbina radial de simples estágio e gerador magnético permanente de alta rotação. Todos os componentes são atribuídos a um único eixo que chega a 96000 rpm.

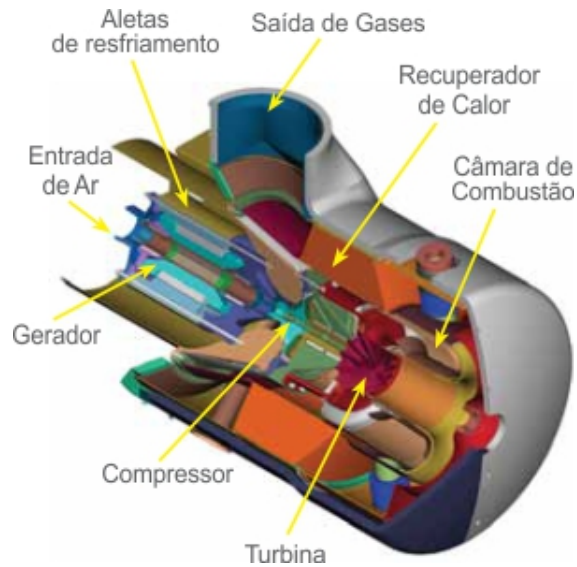


Figura 3 – Microturbina a gás

Fonte: Heimer (2016)

2.2.1.2 Gerador Elétrico

O gerador, de acordo com Kingsley (2003) é um dispositivo que converte a energia mecânica fornecida por uma fonte externa em energia elétrica, pertencendo assim à família das máquinas rotativas. Sua proposta compreende a conversão de energia mecânica em energia eletromagnética ou vice-versa.

A Lei de Indução Eletromagnética de Faraday sustenta a teoria por trás do funcionamento desse dispositivo. A tensão induzida é produzida à partir de um fluxo magnético mutável no interior de uma bobina formada por material condutor.

A Microturbina "Capstone C30", como citado anteriormente, compreende em sua configuração um Gerador magnético permanente de alta rotação que será utilizado para o projeto aqui tratado.

2.2.1.3 Motor Elétrico

Por definição, por Kingsley (2003), o Motor Elétrico é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica. Devido à sua ótima eficiência, os MEs são utilizados em larga escala e em diversas aplicações. Como vantagem a utilização da energia elétrica como fonte de energia, apresenta custo reduzido e possuem em fácil dimensionamento e manutenção.

Os motores elétricos são compostos principalmente pelo rotor (parte móvel) e pelo estator (parte estática). Ambas as partes apresentam ímãs acoplados, a interação entre os ímãs de ambas as partes do motor gera um fluxo rotativo. Em ordem de manter a rotação,

a polaridade dos ímãs deve ser constantemente alternada. A Figura 4 abaixo representa a estrutura de um motor elétrico.

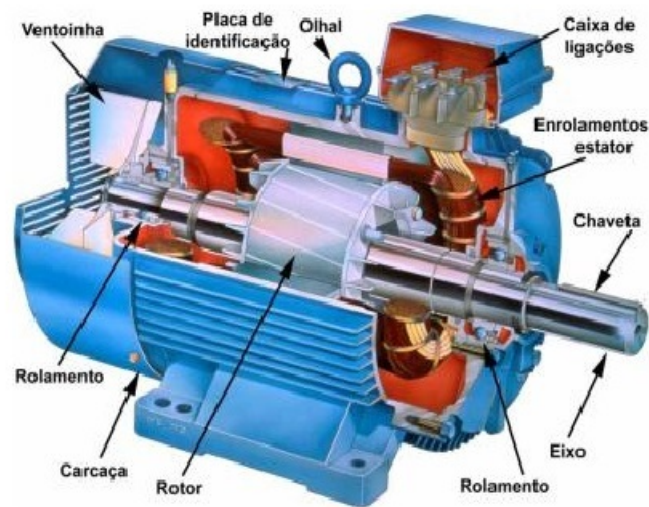


Figura 4 – Motor elétrico

Fonte: Elétrica (2016)

Para o projeto em questão, foi selecionado o motor EMRAX 188, ilustrado na Figura 5, denominado como um motor elétrico de fluxo sincrônico magnético permanente. Dentre suas vantagens: é compacto e leve, baixo ruído e vibração, alta eficiência (98%) e alto torque em baixas rotações.



Figura 5 – Motor elétrico Emrax-188

Fonte: E-Motors (2017)

2.2.1.4 Hélice

A hélice converte energia mecânica rotacional em energia mecânica de translação. A aplicação de torque a uma velocidade rotacional resulta na geração de empuxo que faz com que o veículo aéreo se mova a uma velocidade de translação de acordo com

Schomann (2014). Existem dois tipos de configurações, a hélice tratora e a propulsora como exemplificado na Figura 6 abaixo.

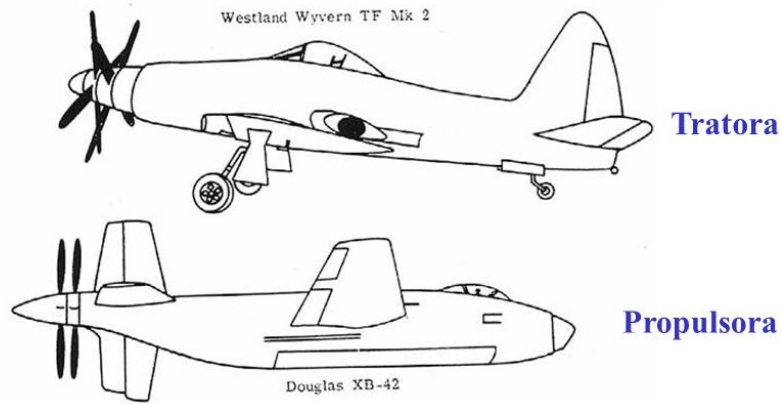


Figura 6 – Configurações de hélices
 Fonte: Almeida (2017)

A hélice é definida por duas dimensões: o diâmetro e o passo. Além disso, analisando a Figura 7, podemos identificar algumas nomenclaturas que definem o formato da hélice como a ponta da asa, borda de ataque e fuga, cubo e raiz.

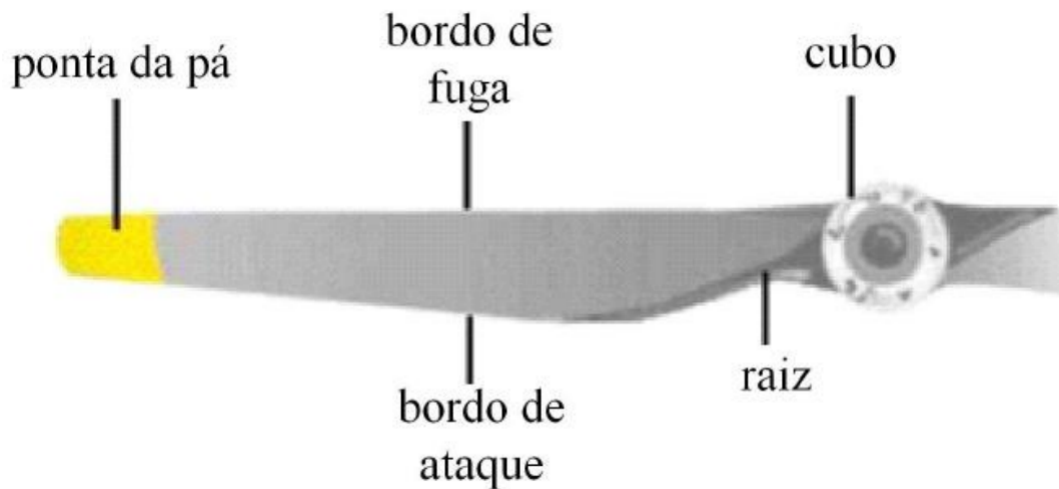


Figura 7 – Características geométricas de hélice
 Fonte: Gomes (2016)

Por definição, o diâmetro representa a distância entre as pontas das pás para o caso de uma hélice bi-pá, no caso de hélices mono-pá ou com múltiplas pás, o diâmetro é representado pela circunferência realizada durante o movimento. O passo por sua vez, representa o avanço (teórico) que a hélice daria em uma única volta, ou seja, uma hélice 13x4 tem um diâmetro de 13 in e seu passo é de 4 in, indicando que esta hélice se deslocaria 4 in para frente a cada volta realizada.

Aerodinamicamente, a pá da hélice pode ser vista como uma asa rotativa. As pás geram sustentação quando em movimento pelo ar. Uma parte desta força, dependendo do ângulo de ataque e do ângulo de torção da pá, contribui para o empuxo da hélice.

O arrasto na geração de empuxo define o torque necessário para girar a hélice. Como uma pá de hélice, que é movida a uma velocidade rotacional constante, experimenta velocidades locais variáveis, a hélice tem uma distribuição variável de corda e torção ao longo de seu raio. Além disso, podem-se ser utilizados vários aerofólios para as diferentes seções da lâmina como mostrado na 8. As perdas da hélice são causadas pelo arrasto. Os tipos de arrasto considerados são análogos à asa, arrasto de atrito, arrasto de forma, arrasto induzido e arrasto de onda.

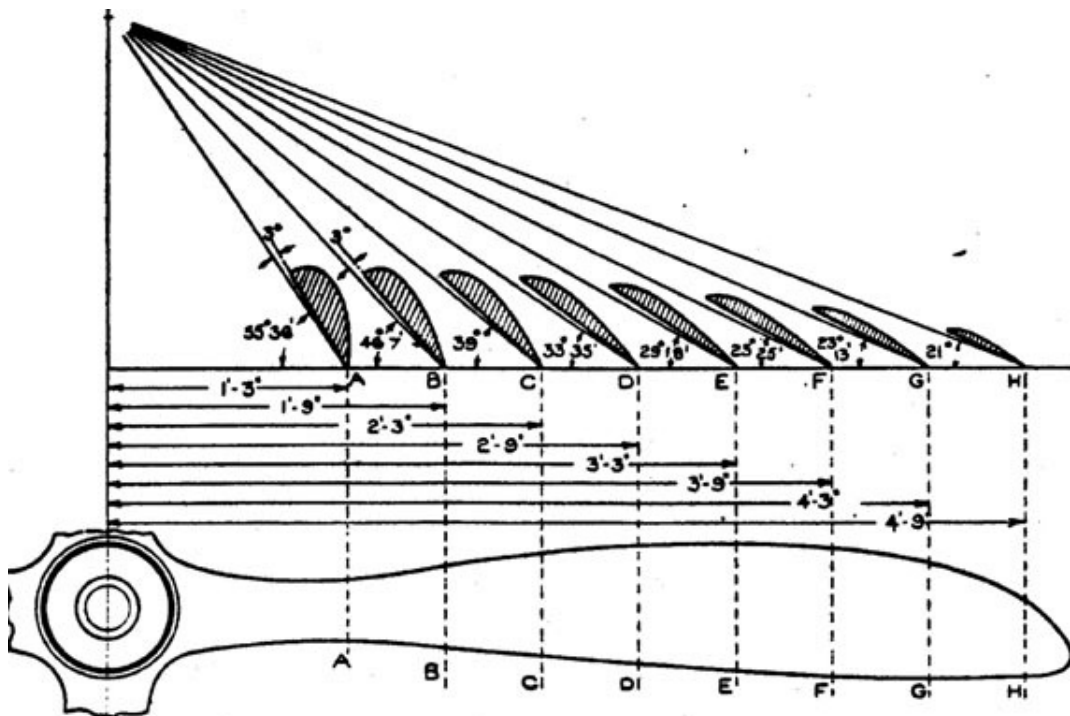


Figura 8 – Aerofólios da pá da hélice

Fonte: Martins (2017)

A geometria da hélice e o vento relativo nas pás, definidas pela corrente livre e pela velocidade de rotação, são os impulsionadores do empuxo gerado e da eficiência da hélice. Em termos de empuxo, de acordo com Anderson (1999), um valor mais alto pode ser obtido com a rotação aumentada, um aumento no diâmetro da hélice ou um aumento no número de pás da hélice. Geralmente uma hélice de maior diâmetro a baixa velocidade rotacional funciona mais eficientemente do que uma hélice de pequeno diâmetro em alta velocidade de rotação. Ambos, empuxo e eficiência são altamente dependentes do aerofólio da lâmina e torção como diz Philips (2009). As principais restrições de projeto para uma hélice são seu número de Mach da ponta e distância ao solo. A velocidade relativa da

hélice é maior em sua ponta. Lá, o número crítico de Mach não deve ser excedido para evitar uma queda significativa na eficiência e aumento do ruído. Uma redução do número de Mach da ponta pode ser obtida reduzindo o diâmetro da hélice ou sua velocidade de rotação. A distância ao solo de uma hélice pode ser segura com uma posição de montagem suficientemente alta, um diâmetro pequeno ou lâminas dobráveis.

2.2.2 Baterias

Por definição, uma bateria é um dispositivo eletroquímico que gera tensão elétrica e é utilizado como armazenamento de energia elétrica. O sistema consiste em uma ou várias células conectadas em paralelo ou em série. Cada célula é composta de dois eletrodos (positivo: cátodo e negativo: ânodo). Durante a descarga, a tensão é gerada em uma reação redox. Quando os eletrodos são introduzidos no eletrólito, um deles sofre oxidação e o outro redução criando assim um potencial elétrico entre os eletrodos. Quando uma carga elétrica do consumidor é conectada à bateria, um fluxo contínuo de elétrons do ânodo ao cátodo é estabelecido como tratado em REDDY (2001).

Devido à sua baixa densidade energética, a bateria é o dispositivo com mais grau de limitação de projetos que envolvem propulsão elétrica. O seu peso e volume são relativamente grande comparados com sua capacidade energética. Diversos estudos atuais estão focando no aumento da densidade energética das baterias, geralmente utilizando o metal lítio levando em consideração sua menor massa comparada a todos os metais.

2.2.3 Transdutores e Sensores

Os transdutores são dispositivos de medida que convertem uma informação de algum fenômeno físico captada por um sensor em um sinal detectável, como apresentado na Figura 9. Esse sinal pode ser elétrico, mecânico, ótico, entre outros Figliola (2007).



Figura 9 – Esquema ilustrativo sobre transdutores

Fonte: Figliola (2007)

Os transdutores compreendem duas categorias, os passivos e os ativos. Os passivos são aqueles que precisam ser excitados por uma fonte externa de energia para produzir um sinal de saída. Enquanto que os ativos, são aqueles que geram uma corrente ou tensão como resposta a um estímulo.

Um sensor, como mencionado, é o dispositivo que responde a um estímulo físico/químico de maneira específica e que pode ser transformado em outra grandeza física para fins de medição ou monitoramento. Os sensores são classificados de acordo com o tipo de energia que detectam, ou seja, são sensíveis. Dessa forma, o transdutor engloba o sensor tornando possível a medição de determinada grandeza.

Para o projeto em questão, iremos aprofundar o estudo nos transdutores de força (célula de carga) e de torque.

2.2.3.1 Transdutor de Força

Devido ao modelo de bancada aqui proposto, o melhor tipo de transdutor de força para atender o projeto é a Célula de Carga.

A célula de carga, como tratado em Omega (2017), é um dispositivo que converte a carga que atua sobre ele em uma saída elétrica mensurável, em grande parte baseadas em sensores de deformação e tensão. Esse equipamento é utilizado em larga escala nos ambientes laboratoriais e operacionais. Os designs de célula de carga podem ser caracterizados pelo tipo do sinal de saída gerado, pneumático, hidráulico e elétrico, ou pela maneira como o "peso" é detectado (flexão, cisalhamento, compressão, tensão, etc.)

A Célula de Carga Hidráulica é um dispositivo de equilíbrio de forças, medindo o peso de acordo com a mudança na pressão do fluido de preenchimento interno. Em uma célula de carga hidráulica tipo diafragma rotativo, uma carga ou uma força atuando sobre a cabeça de carga é transferida para um pistão que, por sua vez, comprime um fluido de preenchimento confinado na câmara do diafragma elastomérico. À medida que a força aumenta, a pressão do fluido hidráulico sobe. Essa pressão pode ser indicada, no local, transmitida para indicação ou controle remoto. A saída é linear e relativamente não afetada pelo volume de líquido de enchimento ou por sua temperatura. Se as células de carga forem adequadamente instaladas e calibradas, a exatidão pode ser de 0,25% do fundo de escala ou superior, o que é aceitável para a maioria das aplicações de pesagem de processo. Esse sensor é ideal para uso em áreas de risco, uma vez que não possui componentes elétricos. As aplicações típicas da célula de carga hidráulica incluem pesagem de tanques, de silos e de tremonhas. Para obter a máxima exatidão, o peso do tanque deve ser obtido instalando-se uma célula de carga em cada ponto de apoio e somando suas saídas.

A célula de carga pneumática também funciona com base no princípio de equilíbrio de forças. Esse dispositivo utiliza múltiplas câmaras de amortecimento para fornecer uma exatidão maior do que a de um dispositivo hidráulico. Em alguns designs, a primeira câmara de amortecimento é usada como tara de pesagem. Células de carga pneumáticas

são frequentemente utilizadas para medir pesos relativamente pequenos em setores onde a limpeza e a segurança representam uma grande preocupação. As vantagens desse tipo de célula de carga incluem serem inerentemente à prova de explosão e não afetadas por variações de temperatura. Além disso, essas células não contêm fluidos que poderiam contaminar o processo caso o diafragma se rompesse. As desvantagens incluem a relativamente baixa velocidade de resposta e a necessidade de limpeza, secagem e regulagem do ar ou do nitrogênio.

A célula com extensômetro (ou sensor de deformação) converte a carga que age sobre ela em sinais elétricos. O próprio sensor é colado em uma viga ou em um elemento estrutural que se deforma quando peso é aplicado. Na maioria dos casos, quatro sensores de deformação e tensão são usados para obter máxima sensibilidade e compensação de temperatura. Normalmente, dois dos sensores estão em tensão e dois em compressão, sendo conectados com os ajustes de compensação. Quando o peso é aplicado, a deformação mecânica altera a resistência elétrica dos medidores de forma proporcional à carga. As outras células de carga estão em desuso, à medida que os modelos com sensores de deformação continuam a aumentar progressivamente a sua exatidão e a reduzirem seu preço unitário.

Dessa maneira, a escolha do tipo de célula de carga para a aplicação devida depende de vários fatores. A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os tipos de células de carga e suas aplicações.

Os tipos mais comuns de célula de carga são tipo S, bending beam (Viga), célula de carga miniatura e subminiatura, extensômetro (strain gage), canister, tensão/compressão e de compensação hidrostática como visto em Omega (2017).

Miniatura: as células de carga miniatura e subminiatura para compressão são projetadas para atuar com carga elevadas em um espaço mínimo, variam entre 0 a 50000 Newtons.

Extensômetro (Strain Gage): são projetados com uma fina grade de fios colada à base da matriz do transportador, a resistência elétrica varia proporcionalmente à deformação da grade.

Bending Beam: consiste em uma viga de flexão de baixa capacidade, variando entre 1 a 500kg e são geralmente utilizada para pesagem.

Tipo S: são geralmente utilizadas para aplicações em tração, mas também podem ser aplicadas em compressão. São projetadas para oferecer o melhor desempenho em unidades compactadas e versáteis, cargas suspensas, pesagem de tanques e tremonhas.

Canister: é usado em aplicações de pesagem única ou múltipla e são hermeticamente

Tipo	Intervalo de Pesagem	Exatidão: FE (Fundo de escala)	Aplicações	Pontos Fortes	Pontos Fracos
Células de Carga Mecânicas					
Célula de Carga Hidráulica	Até 10.000.000 lbs	0,25%	Tanques, silos e tremonhas Áreas de risco.	Suportam altos impactos, insensíveis à temperatura.	Onerosas, complexas.
Célula de Carga Pneumática	Ampla	Alta	Indústria Alimentícia, áreas de risco	Intrinsecamente seguras. Não contém fluidos.	Resposta lenta. Exigem ar limpo e seco.
Células de Carga com Extensômetro					
Célula de Carga tipo Viga de Flexão	10-5k lbs.	0,03%	Tanques, balanças de plataforma.	Baixo custo, construção simples	Sensores de deformação ficam expostos, precisam de proteção
Célula de Carga tipo Viga de Cisalhamento	10-5k lbs.	0,03%	Tanques, balanças de plataforma, cargas descentralizadas	Rejeição de excesso de carga, melhor vedação e proteção	
Célula de Carga tipo Canister	até 500k lbs.	0,05%	Caminhões, tanques, trilhos e balanças de tremonha	Suportam movimentação de carga	Sem proteção horizontal de carga
Célula de Carga tipo Panqueca e Anel	5-500k lbs.		Tanques, silos, balanças	Inteira em aço inoxidável	Movimento de carga não permitido As cargas devem ser centralizadas, movimento de carga não permitido
Célula de carga Tipo botão e arruela	0-50k lbs 0-200 lbs. tip.	1%	Balanças pequenas	Pequenas, baratas	

Tabela 1 – Aplicação dos tipos de células de carga

Fonte: Omega (2016)

seladas e resistentes à água sendo ideais para ambientes severos.

Compensação Hidrostática: utilizada em operações submersas, como pesagem marítima, plataformas submarinas e docas secas.

Tensão/Compressão: apresentam perfil baixo e são altamente precisas no monitoramento de forças de tensão e compressão. Possibilitam a medição bilateral variando a capacidade de 25 a 10000 libras.

2.2.3.2 Transdutor de Torque

O transdutor de torque, de acordo com Schicker Rainer; Wegener (2017), é o dispositivo que utiliza o sensor de torque para medição e monitoramento do torque nos sistemas rotativos como em engrenagens, eixos e transmissões. A Figura 10 mostra um exemplo de transdutor de torque de eixo circular.



Figura 10 – Transdutor de torque de eixo circular

Fonte: HBM (2017b)

Atualmente, a abordagem mais usada é medir a deformação com o auxílio de strain gages (SGs), que modificam sua resistência em proporção à tensão envolvida. Os transdutores de torque SGs consistem principalmente em elementos de mola combinados com strain gages e elementos de compensação, bem como acessórios de adaptação para as conexões de torque nos lados de entrada e saída. As principais características do princípio do SG sendo importantes para a medição do torque são estabelecidas nos termos abaixo de acordo com Portnoi (2001):

- Strain gages usados na ponte de medição SG (ou circuito ponte de Wheatstone, nomeado em homenagem ao cientista inglês Sir Charles Wheatstone), juntamente com seus meios de compensar os efeitos da interferência variáveis, apresentam excelentes características quanto à linearidade, histerese e reprodutibilidade.
- Como os SGs têm massa desprezível, as frequências envolvidas nos processos sob investigação podem ser muito altas (> 50 kHz).
- Momentos estáticos e dinâmicos podem ser adquiridos.
- Os SGs exibem resistência na presença de vibração, tornando-os altamente estáveis sob cargas alternadas.
- Transdutores de torque com SGs exibem estabilidade a longo prazo quando configurados adequadamente para a aplicação em questão.
- Devido à maneira como são fabricados e ao fato de serem produzidos pela mesma empresa, os SGs e corpos de medição (elementos de mola) podem ser adaptados individualmente para trabalharem uns com os outros para otimizar o efeito.
- Devido ao uso de SG especialmente adaptados para mostrar apenas efeitos mínimos de variação de temperatura no sinal de saída, combinados com as propriedades da

ponte de medição e o uso de elementos de compensação adicionais, a temperatura tem efeito mínimo em tais dispositivos. Eles podem, portanto, ser usados em uma ampla faixa de temperaturas.

- O torque pode ser medido em direções positivas e negativas, independentemente do trem de força estar girando.
- A ponte de medição SG pode compensar as variáveis mecânicas altamente críticas que podem causar interferência durante a medição de torque, ou seja, momentos de flexão, forças axiais, forças laterais e efeitos de rotação.

Dentre os tipos de transdutores de torque, temos os de reação, de eixo circular tipo anel deslizante, eixo circular tipo transformadores rotativos, eixo circular tipo clamp-on e de telemetria digital

- Transdutor de Torque de Reação: são sensores de torque não rotativos, que atuam de forma semelhante a um braço de alavanca e uma célula de carga.
 - Vantagens: custo efetivo, menos considerações - porque o sensor de torque não está girando, nenhuma modificação no eixo rotativo.
 - Desvantagens: Redução do tempo de resposta dinâmica, não mede o torque real no eixo, manutenção no mancal do dinamômetro e precisão.
- Transdutor de Torque de Eixo Circular tipo Anel: Um sensor de torque tipo anel deslizante foi projetado há cerca de 40 anos. Ele usa pincéis de grafite que esfregam contra anéis colantes de liga de prata.
 - Vantagens: excitação por corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC), utiliza um método de contato para medir o torque, inércia baixa, pode ser feita para baixas capacidades com faixas de até 1 N.m ou abaixo e opções de montagem - este tipo de sensor permite montar o pé ou não.
 - Desvantagens: rigidez, limitações de rotações por minuto, manutenção do rolamento e ruído de escova elétrica.
- Transdutor de Torque de Eixo Circular tipo Transformador Rotativo: são mecanicamente semelhantes ao sensor do anel deslizante, porém eletricamente utilizando transformadores rotativos. Um transformador é usado para excitar o sensor de torque e um segundo transformador é usado para recuperar os dados.
 - Vantagens: Transmissão de dados sem contato, Inércia baixa, Pode ser feita em baixa capacidade, altas faixas de rotação e opções de montagem - este tipo de sensor permite montar o pé ou não.

-Desvantagens: Deve usar uma fonte de excitação AC, Menores tempos de resposta, rigidez, ruído elétrico, sensível a vibrações

- Transdutor de Torque de Eixo Circular do tipo clamp-on: são ideais quando não é possível dividir o eixo de rotação instalando o sensor em linha.

-Vantagens: baixo custo, faixa de capacidade de baixo torque, altas faixas de rotação.

-Desvantagens: baixa precisão ou alta incerteza, requer cálculos matemáticos

- Transdutor de Torque de Telemetria Digital: é a mais alta tecnologia em sensores de torque,

-Vantagens: menor incerteza, transmissão de dados sem contato, rigidez, sem folga, altas faixas de rotação e baixo ruído elétrico.

-Desvantagens: alta inércia, alto custo e necessidade de conversão de dados

2.2.4 Acoplamentos Mecânicos

Acoplamento é o conjunto mecânico, constituído de elementos de máquina, empregado na transmissão de rotação entre duas árvores de eixo. Os princípios de rotação são transmitidos pelos acompanhamentos os princípio de atrito e de forma. Suas principais funções são: unir dois eixos, compensar desalinhamentos, absorver choques e vibrações, transmitir torque e atuar como fusível como apresentado em Barbosa (2015).

Os acoplamentos classificam-se em permanentes e móveis. Os permanentes atuam continuamente e se dividem em rígidos e flexíveis, já em comutáveis e não-comutáveis. Os acoplamentos podem ser fixos (rígidos), elásticos e móveis. Os acoplamentos fixos servem para unir árvores de tal maneira que funcionem como se fossem uma única peça, alinhando as árvores de forma precisa. Por motivos de segurança, os acoplamentos devem ser construídos de um modo que não apresentem nenhuma saliência.

Quanto à tipologia dos acoplamentos, os fixos servem para ligar de maneira que funcionem sem que haja qualquer movimentação dos eixos que estão sendo unidos, como se fossem uma única peça. Entre os acoplamentos fixos destacam-se o acoplamento com flanges parafusados, onde as flanges se unem por parafusos conforme o próprio termo propõe e os acoplamentos com luva de compressão, onde os eixos ficam firmemente presos por oito parafusos sendo de fácil manutenção pelo formato de montagem.

Os flexíveis são responsáveis por dar maior suavidade a transmissão para evitar que ocorram movimentos bruscos. Dessa maneira, evitam que ocorra desalinhamento entre os eixos causados pelo peso dos componentes ou por dilatação, mas caso ocorram os acoplamentos flexíveis permitem desalinhamento paralelo, angular e axial, construídos

de maneira articulada absorvendo pequenos desalinhamentos de até 6 graus de ângulo de torção e deslocamento angular axial. Alguns modelos que podem ser citados são: acoplamento elástico de pinos, acoplamento Perflex, acoplamento elástico de garras, acoplamento elástico de fita de aço, acoplamento de dentes arqueados, auto-travante com elemento de borracha.

Existem também os acoplamentos flexíveis não elásticos, capazes de acomodar certos desalinhamentos, mas não possuem elasticidade torsional, fazendo com que todos os choques e sobrecargas sejam transmitidos, como, por exemplo, o acoplamento elástico com fita metálica e o de dentes arqueados. Por fim, os acoplamentos móveis, que tem a capacidade de desfazer a união entre motor e máquina permitindo um jogo longitudinal. Os acoplamentos móveis podem ser: de garras ou dentes, onde sua rotação é transmitida por meio do encaixe destes.

Na figura 11 é apresentado um esquema simplificado dos tipologias dos acoplamentos em geral.

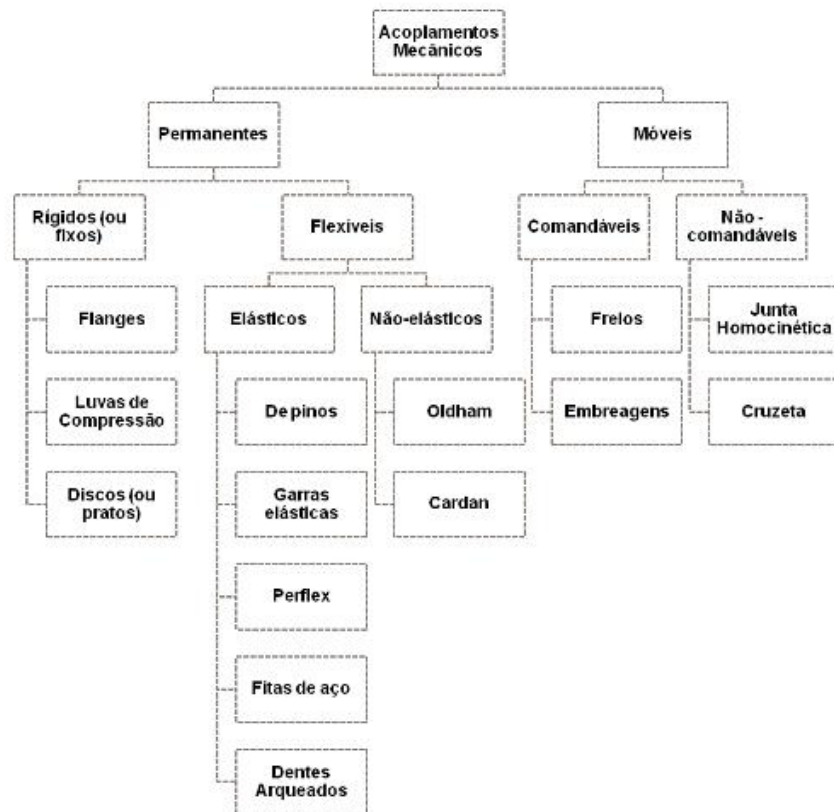


Figura 11 – Tipologias dos acoplamentos mecânicos

Fonte: Autor

O que define a aplicação de cada tipo de acoplamento são basicamente sua capacidade à resistência ao torque e a furação de acordo com o eixo que será fixado. A seguir temos a Figura 12 ilustrativo de alguns acoplamentos.



Figura 12 – Acoplamentos mecânicos

Fonte: Kalatec (2017)

3 COMPONENTES DA BANCADA DE INSTRUMENTAÇÃO

A aplicação da bancada instrumental aqui proposta visa atender à ensaios de hélice que determinarão a eficiência do sistema de propulsão elétrico-híbrido de forma à analisar sua possível aplicação em aeronaves tripuláveis de acordo com seus planos de voo. Dessa maneira, se faz necessário uma tipologia de bancada que abranja uma boa extensão de medidas caso as diretrizes do projeto e dos testes sejam alteradas.

Como se trata de um projeto acadêmico em processo de desenvolvimento, os dados exatos de tipo de aeronave e plano de voo ainda não foram definidos. Dessa maneira, todos os itens de medição compostos nesse projeto partiram de uma metodologia de escolha baseada em equipamentos básicos já estipulados como o grupo moto-propulsor e o motor elétrico.

Utilizando as medições dos parâmetros de empuxo criado pelo propulsor, o torque do conjunto motor/hélice e a velocidade de rotação do eixo junto aos transdutores (força, torque) e ao monitoramento via controlador lógico programável (CLP), é possível o desenvolvimento de vários trabalhos acadêmicos relacionados à propulsão híbrida.

3.1 MICROTURBINA CAPSTONE C30

No projeto será utilizada a microturbina à gás Capstone C30 que gera 30kW de potência. A máquina possui uma configuração de eixo simples, compressor centrífugo e turbina radial de simples estágio. Um gerador de ímã permanente de alta rotação encontra-se acoplado ao eixo. A saída do gerador está ligada a um sistema eletrônico de potência, para reduzir a frequência do sinal gerado (750 – 1600 Hz) para frequência da rede (60 Hz), e gerar energia com baixo nível de harmônicos. Possui um recuperador tipo anular integral que aumenta a eficiência térmica do sistema como observado em Microturbine (2017).

A potência máxima gerada pela micro-turbina diminui com a redução na pressão atmosférica (aumento da altitude), com o aumento na temperatura ambiente, ou por restrições na entrada de ar ou saída dos gases. O gás de exaustão possui alta temperatura e baixo nível de emissões e pode ser utilizado para gerar energia térmica em processos com geração combinada de energia elétrica e calor/frio.

Especificações da turbina:

- Combustível padrão: Diesel;
- Potência nominal: 30 kW;
- Rotação: 45.000 – 96.000 rpm;

- Temperatura na chaminé: 180 – 330 °C;
- Temperatura na saída da turbina: 671 – 593 °C (variando de 45.000 a 80.000 RPM);
- Produção de NOx < 9 ppm;
- * Condições ISO (15°C no nível do mar).

A micro-turbina é formada por: compressor, regenerador, câmara de Combustão, turbina e gerador.

3.2 MOTOR ELÉTRICO EMRAX 228

O projeto em questão utiliza o motor EMRAX 228 como final das máquinas do grupo gerador como introduzido previamente no Capítulo 2. Esse dispositivo, é considerado um novo conceito de motor elétrico síncrono de imã permanente com fluxo axial. O mesmo pode operar como motor ou gerador com as mesmas características de performance.

Como os motores EMRAX foram desenvolvidos para aviões, suas características principais são a confiabilidade, o baixo peso, a alta potência no eixo e a alta eficiência.

Características dos motores EMRAX a partir de (E-Motors, 2017):

- Fluxo axial - motor síncrono de imã permanente;
- Tipo de alimentação: trifásico senoidal;
- Baixa relação Potência/Peso - até 10 kW/kg;
- Alto torque em baixas rotações;
- Alta eficiência - até 98%

A seguir é apresentada a tabela que constitui as principais especificações técnicas fornecidas pelo fabricante em relação ao motor EMRAX 228.

Type	EMRAX 228 High Voltage			EMRAX 228 Medium Voltage			EMRAX 228 Low Voltage		
Technical data									
Air cooled = AC Liquid cooled = LC Combined cooled = Air + Liquid cooled = CC	AC	LC	CC	AC	LC	CC	AC	LC	CC
Ingress protection	IP21	IP65	IP21	IP21	IP65	IP21	IP21	IP65	IP21
Cooling medium specification (Air Flow = AF; Inlet Water/glycol Flow = WF; Ambient Air = AA) If inlet WF temperature and/or AA temperature are lower, then continuous power is higher.	AF=20m/s AA=25°C	WF=8l/min at 50°C; AA=25°C	WF=8l/min at 50°C; AA=25°C	AF=20m/s AA=25°C	WF=8l/min at 50°C; AA=25°C	WF=8l/min at 50°C; AA=25°C	AF=20m/s AA=25°C	WF=8l/min at 50°C; AA=25°C	WF=8l/min at 50°C; AA=25°C
Weight [kg]	12,0	12,3	12,3	12,0	12,3	12,3	12,0	12,3	12,3
Diameter ϕ / width [mm]	228/86								
Maximal battery voltage [Vdc] and full load/no load RPM	670 Vdc (5300/6500 RPM)			470 Vdc (5170/6500 RPM)			130 Vdc (4400/5200 RPM)		
Pico de potência do motor em rotação máxima (por alguns segundos em partide quente) [kW]	100								
Continuous motor power (at 3000-5000 RPM) depends on the motor RPM [kW]	28 - 42	28 - 42	35 - 55	28 - 42	28 - 42	35 - 55	28 - 42	28 - 42	35 - 55
Máxima velocidade de rotação [RPM]	5500 (6500 RPM peak for a few seconds)								
Maximal motor current (for 2 min if cooled as described in Manual) [Arms]	240			340			900		
Continuous motor current [Arms]	115			160			450		
Torque máximo no motor (por alguns segundos) [N.m]	240								
Torque contínuo do motor [N.m]	125								
Torque / motor current [Nm/1Aph rms]	1,1			0,75			0,27		
Maximal temperature of the copper windings in the stator and max. temperature of the magnets [°C]	120								
Motor efficiency [%]	92 – 98								

Tabela 2 – Informações do motor Emrax-228

Fonte: Adaptado de E-Motors (2017)

O motor elétrico do projeto pode atingir alta potência mesmo em baixas rotações devido ao seu alto torque. Ele possibilita um acionamento sem engrenagens sem um redutor comum, que causaria perdas energéticas, peso adicional e complexidade de manutenção.

A escolha do motor EMRAX 228 se torna clara por o mesmo apresentar a maior densidade de potencia do mercado e baixas perdas elétricas e mecânicas.

3.3 TRANSDUTOR DE FORÇA

O projeto de bancada aqui proposto visa avaliar e monitorar a performance de operação dos grupos geradores utilizados principalmente no âmbito acadêmico. Para tal, precisamos dimensionar e definir os dispositivos de medição que transformam as características físicas em dados de monitoramento.

O primeiro passo para a escolha do dispositivo é a definição em relação à sensibilidade do sensor que podem ser células de carga pneumáticas, hidráulicas e por extensômetros (sensor de deformação). Dessa maneira, analisaremos somente as tipologias de células de carga por sensor de deformação devido à excitação partir de uma aplicação em laboratório com fácil acesso à energia elétrica, menor manutenção e rápida taxa de resposta no monitoramento.

3.3.1 Empuxo Estático Máximo

Para a seleção do transdutor de força, é preciso quantificar de forma abrangente os dados de saída que o grupo gerados pode proporcionar. Nesse caso, como se trata de uma bancada com voltada para o mercado aeronáuticos, a força medida pela célula de carga será o empuxo gerado pela hélice acoplada no motor elétrico.

Como dito anteriormente, ainda não foram definidas as condições de voo e as configurações aerodinâmicas da aeronave. O projeto se trata de uma configuração de bancada ampla e que proporcione uma margem para mudança de certos parâmetros de projeto. Dessa maneira, precisamos estipular a tração máxima gerada pelo grupo propulsor de forma teórica utilizando somente os dados de entrada da hélice e do motor elétrico.

Devido à dificuldade de cálculo analítico do escoamento em torno da hélice, o estudo de desempenho de hélice tem um caráter experimental acentuado. Artíficos como as simulações computacionais de fluídos (CFD) e medições experimentais dos parâmetros de desempenho possibilitaram uma formulação mais compreensível. Dessa forma, as equações geradas relacionam os parâmetros que apresentam uma maior praticidade de medição como potência, passo de hélice, velocidade de rotação, diâmetro de hélice e densidade do fluído de trabalho.

O estudo da tração estática, ou seja, a tração para velocidade de voo nula se baseia em parâmetros distintos daqueles usados para o desempenho geral das hélices. A teoria de hélices, aplicada à situação de velocidade nula, implica que a tração fornecida por uma dada hélice é diretamente proporcional à potência desenvolvida pelo motor e inversamente proporcional à rotação e ao diâmetro de acordo com Diehl (1932):

$$T_0 = \frac{K_{T_0} P}{nD} \quad (3.1)$$

A determinação da constante K_{T_0} é feita de forma empírica. No entretanto, é possível estabelecer uma relação linear entre K_{T_0} e a razão passo/diâmetro da hélice ($\frac{p}{D}$), conforme se verifica em Diehl (1932) e Warner (1927) com estudos feitos com hélices de diferentes dimensões e perfis aerodinâmicos:

$$K_{T_0} = 57000 \left(1,97 - \frac{p}{D}\right) \quad (3.2)$$

A Eq.3.2 pressupõe a utilização, na Eq.3.1, de potência em *cavalos de potência*, rotação em *rotações por minuto* e diâmetro em *pés*. A equação acima é colocada aqui como forma de mostrar a possibilidade de se estimar K_{T_0} sem a realização de ensaios das hélices.

A partir da metodologia proposta, é possível encontrar um valor aproximado do

empuxo máximo teórico para uma determinada hélice estipulada. Para o projeto aqui proposto usaremos uma hélice de passe constante 56×26 , ou seja 56 polegadas de diâmetro e 26 polegadas de passo. Como essa variável pode mudar no decorrer do projeto, iremos considerar um fator de segurança alto, pois dessa maneira o dispositivo não ficará limitado caso os parâmetros de entrada mudem. Ao mesmo tempo, se a escala do sensor for muito alta a proporção do erro de medida comparado com o valor medido ficará fora do desejado. Portanto usaremos um fator de correção para o empuxo máximo calculado.

3.3.2 Tipologia

Para a finalidade do projeto, após analisar as definições e utilização da célula de carga foi possível eliminar opções que não apresentam relação de aplicação para nosso objetivo. Conclui-se que as tipologias que poderiam ser aplicadas são:

- Miniatura
- Bending Beam
- Tração
- Compressão
- Tipos S

Em seguida, um ponto limitante para a escolha da tipologia de medição da célula de carga será o funcionamento da bancada, ou seja, como o grupo motor irá excitar o mesmo. Como mostrado no Capítulo 2, para cada tipologia de transdutor de força existem algumas aplicações ideais e também um alcance de medição em que eles conseguem trabalhar.

Para a definição da tipologia da célula de carga o fator crucial é a maior praticidade de acoplamento do objeto que irá excita-lá (o grupo propulsor) e a segurança.

3.3.3 Especificações Básicas

Existem algumas características dos transdutores de força que não apresentam padrão em relação às tipologias existentes, entretanto são fatores determinantes para a definição do dispositivo ideal para a bancada proposta.

Dentre essas características:

- Duração da Medição: os testes terão longa duração em situações que a tara não é aplicável.
- Requisitos da Saída: podem apresentar saídas USB, analógica mV/V (0 a 5V), 4 a 20 mA ou sem fio.

- Velocidades de Medição: 1 Hz, até 100 Hz e acima de 100 Hz.
- Percentual de exatidão exigido: como percentual de leitura ou percentual de saída de fundo de escala.
- Condições de temperatura operacional: temperatura ambiente, temperatura externa, ambiente bem controlado, ambiente severo com grandes variações de temperatura e umidade.
- Certificações exigidas: aplicações comerciais: certificações Nexo Técnico Epidemiológico Previdenciário (NTEP) ou Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML), certificação da "American Society for Testing and Materials"(ASTM) E-74 ou R&D para teste ou medição.
- Histerese: retardo na resposta de uma unidade do sistema quando existe um acréscimo ou decréscimo no valor do sinal.

3.4 TRANSDUTOR DE TORQUE

O segundo dispositivo da bancada de instrumentação a ser selecionado é o transdutor de torque. Esse aparelho de medição nos permite monitorar o torque disponível no eixo do motor elétrico, fator crucial para a análise do desempenho do grupo propulsor.

Para a seleção do torquímetro, foram avaliados os principais parâmetros que influenciam na qualidade final de medição entre eles sua tipologia levando em consideração os componentes a serem medidos, a velocidade de rotação máxima, o torque máximo proporcionado e o preço do aparelho.

3.4.1 Torque máximo

Em quase todos os casos, se tem uma ideia aproximada do torque esperado presente no estágio de operação. As especificações básicas do motor elétrica fornece o seu torque de operação.

No entanto, deve-se notar que na maioria dos setores de construção de máquinas, a expressão torque nominal será considerada como significando um torque médio que pode ser mantido por um período razoavelmente longo. O pico de torque é muitas vezes consideravelmente maior. No caso de um transdutor de torque, por outro lado, o torque nominal refere-se ao limite da escala superior de sua faixa de medição, em outras palavras, este é um limite que não deve ser excedido em operação normal. Um transdutor de torque com o mesmo torque nominal que a máquina com a qual está relacionada está subdimensionado na maioria dos casos.

É possível usar a relação entre torque, velocidade e potência mecânica através da Equação 3.3.

$$P = M_D \Omega \quad (3.3)$$

$$\Omega = 2\pi n \quad (3.4)$$

Nesse caso P se refere à potência (W) e Ω à velocidade angular.

Sendo assim, temos que:

$$M_D = \frac{60P}{2\pi n} \quad (3.5)$$

Em que os parâmetros M_D (torque), P (potência) e n (rotação) são medidos respectivamente em $N.m$, W e rpm.

Geralmente em testes de desempenho, iremos variar a rotação do sistema ou a potência fornecida e avaliar a alteração do torque. Tudo irá depender do que se deseja avaliar, dessa forma será apresentado aqui o gráfico de variação de potência, torque e velocidade de rotação do motor elétrico utilizado no projeto aqui tratado (Figura 13).

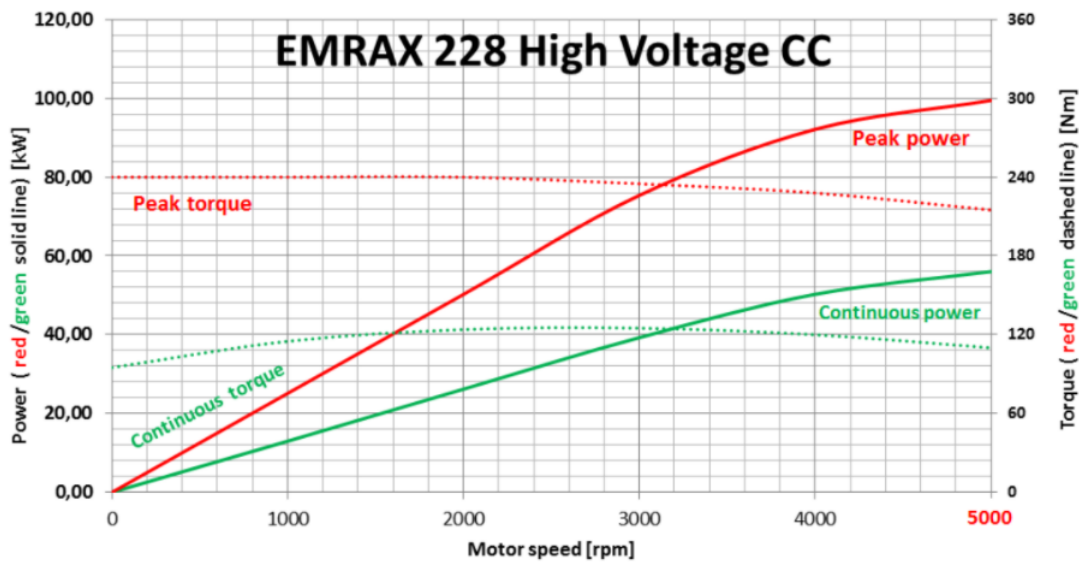


Figura 13 – Relação de potência e torque em relação à rotação

Fonte: E-Motors (2017)

É apresentado que a tração nominal de trabalho do motor varia em torno dos 125 N.m, porém apresentando baixa amplitude de mudança. À medida em que a velocidade de rotação aumenta, a potência também aumenta (mantendo o torque constante).

3.4.2 Tipologia

O transdutor de torque será utilizado entre dois motores elétricos, um dos motores irá funcionar como motor elétrico e o outro poderá funcionar como gerador, ser desvinculado da bancada ou funcionar como carga. Dessa maneira, a tipologia escolhida precisa levar em consideração a melhor maneira de montagem do sistema de medição.

Levando em consideração as tipologias estudadas e apresentadas no Capítulo 2, é possível observar que ambos os transdutores de torque de eixo circular quanto os de telemetria digital atenderiam a necessidade do projeto. Por se tratar de uma bancada acadêmica em um ambiente com estrutura, os benefícios do sensor por telemetria não compensam a grande diferença de valor entre essas duas tipologias. Dessa forma, considera-se somente os transdutores de torque de eixo circular.

Dentre os modelos de torquímetros de eixo circular, temos as opções dos tipos anel, transformador rotativo e clamp-on. A bancada permite que o dispositivo fique entre dois eixos separados, o que elimina a necessidade de um sensor clamp-on. Já o transdutor de torque de eixo circular tipo anel, apresenta limitação de velocidade de rotação e pode-se chegar à 6500 *rpm*. É possível concluir que o modelo ideal para o projeto é o transformador rotativo em que temos altas faixas de rotação e capacidade, além de permitir várias opções de montagem. Por se tratar de ensaio estático, a sensibilidade a vibração pode ser controlada e além disso o laboratório nos permite amenizar os ruídos elétricos.

3.4.3 Especificações Básicas

Existem alguns fatores e características dos transdutores de torque que nos auxiliam na escolha do dispositivo mais adequado para a operação. Esses pontos são de extrema valia devido à grande variedade de modelos oferecidos no mercado.

Dentre as condições de operação e as características básicas que tem influencia na aplicação dos torquímetros temos:

- Velocidade de rotação de operação máxima

O transdutor de torque e o acoplamento devem sobreviver sem danos a todos os velocidades. As velocidades nominais indicadas nas especificações devem, portanto, corresponder, no mínimo, à velocidade máxima de operação que provavelmente ocorrerá. O sentido de rotação não é relevante.

- Medição de velocidade e ângulo de rotação

Muitos transdutores de torque da HBM são equipados com um sistema de medição de velocidade como padrão ou como opção, e alguns também são equipados com um sistema de medição de ângulo de rotação (consulte o capítulo 3). Para avaliar se tal

sistema é adequado para a aplicação em questão, primeiro é necessário considerar se a direção e, possivelmente, o ângulo de rotação precisam ser adquiridos além da velocidade, e se o sistema sob consideração requer uma velocidade mínima. para um sinal de medição de velocidade estável.

A resolução também deve ser levada em conta. Por outro lado, o número de pulsos gerados pelo sistema por revolução também deve ser considerado em relação à velocidade, já que em velocidades muito altas combinadas com um alto número de pulsos, o sinal de saída é frequentemente tão alto que não pode ser analisado sem muito esforço.

- **Manutenção**

Os requisitos de manutenção desempenham um papel cada vez mais importante. Os transdutores de torque com anéis coletores requerem manutenção regular, especialmente porque há uma vida útil limitada para escovas de anel deslizante. A graxa usada como lubrificante nos acoplamentos dentais deve ser trocada periodicamente. Transdutores de torque com transmissão de sinal de medição sem contato e rolamentos requerem menos manutenção, graças à vida útil muito alta de seus rolamentos, mas não podem ser considerados livres de manutenção. Os transdutores de torque que são construídos sem rolamentos e possuem transmissão de sinal de medição sem contato são isentos de manutenção e sem desgaste, assim como acoplamentos como o tipo de fole ou de discos múltiplos.

Sistemas ópticos abertos para medição de velocidade correm o risco de contaminação se usados em condições desfavoráveis. As instruções de limpeza são mostradas na documentação técnica.

3.5 Acoplamento

Os acoplamentos mecânicos serão utilizados na bancada de instrumentação para unir os eixos do transdutor de torque e do motor elétrico. Sua escolha de tipologia leva em consideração a aplicação acadêmica e as características do ambiente em que o teste irá acontecer, além de considerar os recursos utilizados na montagem da parte estrutural da bancada.

É importante perceber que qualquer desalinhamento em relação aos dois eixos citados, irá resultar em uma força de cisalhamento no acoplamento. Primeiramente, definimos que a classe global do acoplamento será a permanente pois a fixação é estável. Em segundo lugar, a tipologia escolhida foi a flexível. Foi levado em consideração que as perdas por deformação no acoplamento são insignificantes quando comparadas à segurança da bancada. Essa tipologia permite maior suavidade na transmissão de energia entre os

eixos, absorvendo as forças de torção devido a trancos e ao desalinhamento angular axial.

Após restringir as opções de acoplamento por sua tipologia, precisamos agora definir o modelo do acoplamento levando em consideração o material utilizado na construção relacionando-o ao cálculo de torque máximo que o será transmitido.

Para o cálculo de máximo torque suportado pelo acoplamento é utilizada a Tabela 3.

MÁQUINA ACIONADORA						Motor elétrico ou turbina a vapor						
MÁQUINAS ACIONADAS						Fator de Serviço - "F1"						
a) Com serviço regular e reduzidas massas a acelerar						1,15						
b) Com serviço regular e pequenas massas a acelerar						1,25						
c) Com serviço irregular e médias massas a acelerar						1,30						
d) Com serviço irregular e médias massas a acelerar com choques						1,45						
e) Com serviço irregular e médias massas a acelerar com choques fortes						1,50						
f) Com serviço irregular e grandes massas a acelerar com choques muito fortes						1,85						
g) Outros equipamentos						Sob consulta						
FUNCIONAMENTO DIÁRIO (horas)	mais de até	-	8	16	PARTIDAS/HORA	01	11	21	41	81	acima de	
		8	16	24		10	20	40	80	160	160	
FATOR - "F2"		1,0	1,07	1,10	EM FUNÇÃO DO TIPO DE CARGA DA TABELA DE F1	FATOR - "F4"						
TEMPERATURA AMBIENTE (°C)		-	75	85		a)	1	1,10	1,20	1,25	1,40	1,50
		75	85	-		b)	1	1,10	1,15	1,20	1,35	1,40
FATOR - "F3"		1,0	1,1	*		c)	1	1,07	1,15	1,20	1,30	1,40
						d)	1	1,07	1,12	1,15	1,20	1,30
						e)	1	1,05	1,12	1,15	1,20	1,30
						f)	1	1,05	1,10	1,12	1,12	1,12
						g)						
						Sob consulta						

Tabela 3 – Tabela para cálculo do momento no acoplamento

Fonte: Adaptado de Barbosa (2015)

A partir da tabela, iremos utilizar os fatores de serviço F1, F2, F3 e F4 na equação 3.6 de momento no acoplamento apresentada a seguir :

$$M_{eq} = \frac{CNF_s}{n} \quad (3.6)$$

$$F_s = F_1 F_2 F_3 F_4 \quad (3.7)$$

Em que N é a potência de máquina acionadora (kW ou cv), n é a rotação de trabalho do acoplamento (rpm), F_s é o fator de serviço e C é uma constante relacionada à unidade de N , quando utilizada em kW apresenta valor 9550 e quando utilizada em cv 7030.

Em seguida, se faz necessário avaliar a disponibilidade do modelo do sensor levando em consideração às mínimas e máximas medidas possíveis de abertura de furo do acoplamento para anexar aos eixos de aplicação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após definirmos os conceitos por trás de cada sensor da bancada instrumental presente no Capítulo 2 e explicar a metodologia de escolha de cada transdutor presente no Capítulo 3, é possível definir os dispositivos de instrumentação do projeto.

4.1 Sensor de Força

Na sessão presente iremos apresentar os dados utilizados para definir a tração máxima estática no propulsor. Esse parâmetro como já dito, é o que define a alcance mínimo da célula de carga a ser utilizada na bancada em questão.

A hélice utilizada para simulação dos resultados de empuxo estático teórico apresenta diâmetro (D) de 56 polegadas, passo (P) de 26 polegadas e ângulo de ataque 11, 14 graus. A escolha da hélice foi definida levando em consideração a futura aplicação dessa bancada de instrumentação em que o empuxo máximo ocorre na potência de operação do motor elétrico e não será discussão para esse trabalho.

Com a intenção de encontrar a tração estática máxima, utilizamos a Equação 3.1 e a Equação 3.2 que relaciona as características da hélice, a potência do motor elétrico e a velocidade de rotação.

A Tabela 4 apresenta os resultados de empuxo estático em relação à potência e velocidade de rotação.

Tabela 4 – Resultados da força de empuxo estático teórico

Rotação (rpm)	Potência (kW)	Empuxo Estático (kgf)
1000	12	132,49
1500	20	147,21
2000	27	149,05
2400	30	138,01
3000	40	147,21
3500	44	138,80
4000	48	132,49

Analisando os resultados, é observado que o empuxo estático máximo ocorre à 2000 *rpm* e 27 *kW* de potência com magnitude de 149,05 *kgf*.

Por questões de futuros projetos e possíveis alterações nos parâmetros de entrada para o cálculo da tração disponível estática máxima, iremos utilizar uma célula de carga que compreenda medição de no mínimo 200 *kgf*.

O próximo passo é a definição da tipologia do transdutor de força. A proposta da bancada de propulsão a ser medida propõe que o motor elétrico esteja livre para

movimentação e assim exerça força na célula de carga. Foi definido um sistema de trilhos para a movimentação do ME e assim é necessário um transdutor de torque que possibilite a medição para a necessidade proposta.

É comum para testes de desempenho em motores elétricos para aeromodelos a utilização de células de carga do tipo *Bending Beam*, entretanto para esse projeto o porte do motor torna essa tipologia complexa. O tipo *S* é indicado para medição de cargas suspensas o que não vai de encontro com o projeto. Portanto, pela definição da montagem da simulação da bancada, podemos observar que o ideal será a utilização de um transdutor de força com leitura axial de compressão ou tração.

Tendo como ponto de referência a hélice no extremo direito da visão lateral da bancada, o sentido de movimentação do grupo propulsor é para a direita. Além disso, a "ponta da hélice é dinâmica (rotacional) o que dificultaria uma possível medição por compressão entre a hélice e a célula de carga. Assim, a tipologia adotada será a por tração. A célula de carga será fixada em um suporte na bancada e o motor elétrico será fixado na outra extremidade, quando o grupo *ME* + hélice se mover será possível monitorar a força de empuxo estático sofrido pelo transdutor de força.

O sistema de monitoramento será a partir de CLP e assim a célula de carga requisita saída analógica mV/V ou mA . Todas os dispositivos cotados apresentam essa característica como premissa.

Utilizando as características aqui discutidas, a célula de carga que melhor atende as necessidade do projeto foi o modelo U3 da marca HBM com capacidade de leitura de 2 kN representada pela Figura 14 como apresentado em HBM (2017b).



Figura 14 – Célula de carga U3 (2 kN).

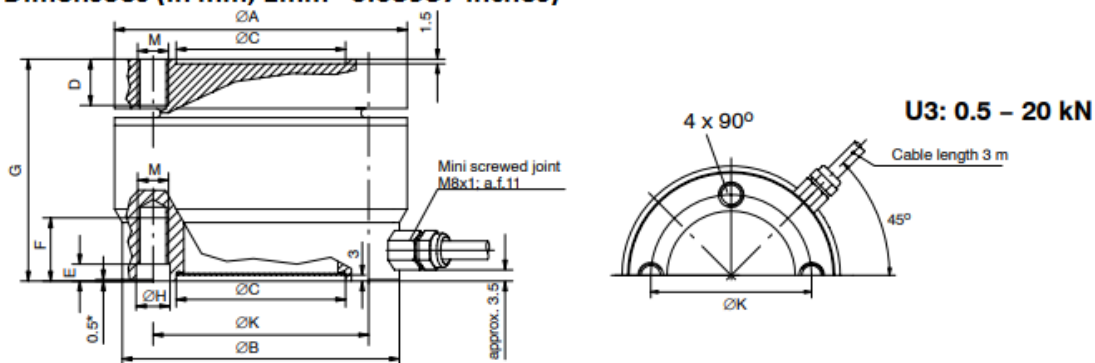
Fonte: HBM (2017b)

A seguir temos a tabela que compreende as dimensões do sensor selecionado, representado na Tabela 5.

Tabela 5 – Dimensões célula de carga U3

Fonte: HBM (2017b)

Dimensões (in mm; 1mm= 0.03937 inches)



Força Normal	$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C^{H8}$	D	E	F	G	$\varnothing H$	$\varnothing K \pm 0.1$	M
U3/0.5–10 kN	54	50	34	8.5	5	13	47	5.5	42	M5

Por fim, as características técnicas em relação à célula de carga U3 são apresentadas na Tabela 6

Tabela 6 – Características célula de carga U3

Parâmetro	Índice	Unidade de Medida	Valor
Nominal Force	F_{nom}	kN	2
Classe de Precisão			0.2
Resistência de Entrada	R_e	Ω	300 - 400
Resistência de Saída	R_a	Ω	>345
Var. de Temperatura de Operação	$B_{t.G}$	$^\circ C$	-30 a +85
Força de Operação Max.	F_G	%	150
Força Limite	F_L	%	100
Força de Quebra	F_B	%	>300
Limite de Força Estática Lateral	F_Q	%	100
Deslocamento Nominal	S_{nom}	mm	0.08
Frequência Nominal de Ressonância	F_g	kHz	3.1
Peso		kg	aprox. 0.6
Comprimento do cabo		m	3

4.2 Sensor de Torque

Agora, analisaremos o torque no eixo do motor. As características do motor elétrico *EMRAX 228* apontam o pico de torque máximo e o torque contínuo de operação (Tabela 2). Entretanto, se faz necessário verificar esses dados.

A partir da Equação 3.5 foram utilizados os mesmos dados de entrada que no cálculo da tração disponível teórica na sessão anterior e seus respectivos valores de torque

foram calculados como segue na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do torque no eixo do motor

Rotação (rpm)	Potência (kW)	Torque (N.m)
1000	12	114,59
1500	20	127,32
2000	27	128,92
2400	30	119,37
3000	40	127,32
3500	44	120,05
4000	48	114,59

Observamos dessa maneira que o torque máximo teórico acontece também à 2000 *rpm* e 27 *kW* de potência com magnitude de 128,92 *N.m*.

Como o máximo de torque no eixo do *ME* é de 240 *N.m* e há a possibilidade de alteração dos parâmetros de entrada do projeto, iremos dimensionar o transdutor de torque para no mínimo este valor. Além disso, pela mesma razão, iremos utilizar uma rotação mínima de 6500 *rpm* para a seleção do dispositivo.

De acordo com as necessidades aqui tratadas, foi possível selecionar o transdutor de torque ideal para a operação da bancada de testes aqui proposta. Como a rotação é relativamente alta em comparação com o limite da maioria dos sensores, os dispositivos compatíveis foram bastante reduzidos. Entretanto, o sensor de torque da marca HBM modelo T22 com capacidade de 500 *N.m* como representado na Figura 15 e na literatura HBM (2017a).



Figura 15 – Transdutor de torque T22 (500 *N.m*).

Fonte: HBM (2017a)

A Tabela 8 abaixo apresenta as características principais do dispositivo selecionado.

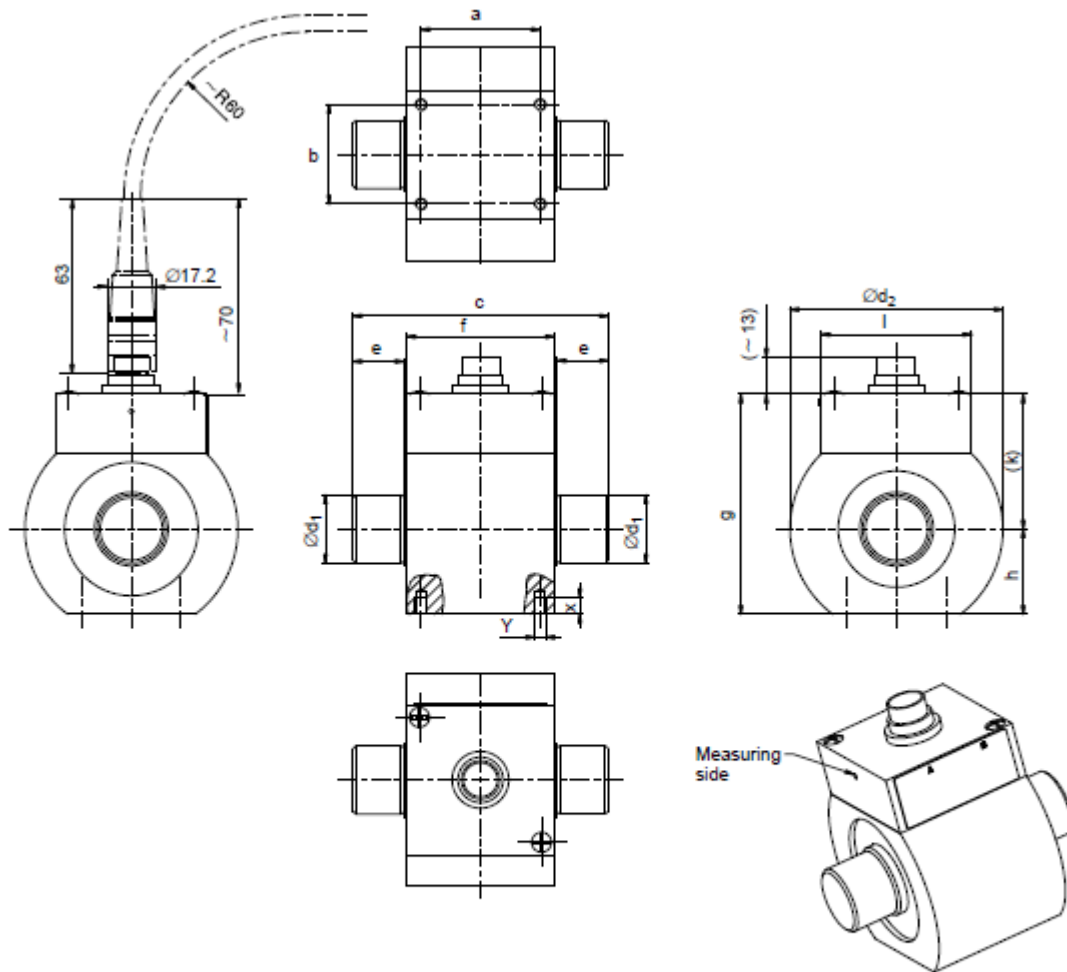
Tabela 8 – Características transdutor de torque T22

Parâmetro	Unidade de Medida	Valor
Nominal torque M_{nom}	$N.m$	500
Classe de Precisão		0.5
Saída Nominal em Voltagem	V	5
Saída Nominal em Corrente	mA	8
Velocidade de Rotação Nominal	rpm	9000
Torque Limite	$\%$	200
Torque de Quebra	$\%$	>280
Limite de Força Longitudinal	kN	4
Limite de Força Lateral	$\%$	100
Limite de Momento Torcional	$N.m$	54
Rigidez Torcional	$kN.m/rad$	52.4
Ângulo Torcional	$Graus$	0.22
Peso	kg	2.4

Por fim, as informações com relação ao dimensionamento do transdutor de torque pode ser encontrado na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Dimensões transdutor de torque T22

Fonte: HBM (2017a)



Alcance de Medição (N·m)	Dimensões												
	a	b	c	e	f	g	h ±0.05	(k)	l	Ød1 g6	Ød2 ±0.1	Y	X
500	50	55	120	26	65	97.5	40	57.5	75.5	40	105	M5	10
1k													

O projeto necessita de um sensor que suporte 240 *N.m*, dessa forma foi selecionado o modelo T22 com alcance de 500 *N.m* por ser o subsequente do alcance de 200 *N.m*.

4.3 Acoplamento

Para a definição do acoplamento mecânico que uni os eixos do transdutor de torque e do motor elétrico, como visto no capítulo anterior teremos que definir entre os modelos elástico e não-elástico de acordo com o momento total que será calculado nessa sessão e às medidas dos eixos dos dispositivos relacionando-os com a disponibilidade dos acoplamentos no mercado.

De acordo com a Tabela 3 e as condições de trabalho da bancada de teste aqui tratada podemos definir os componentes para cálculo dos fatores de serviço como:

- $F_1 = 1,15$
- $F_2 = 1$
- $F_3 = 1$
- $F_4 = 1$

Dessa forma, utilizando as Equações 3.7 temos que $F_s = 1,15$. Além disso, de acordo com a Equação 3.6 utilizando os dados $C = 9550$, $N = 30 \text{ kW}$ e $n = 5000 \text{ rpm}$ temos que $M_{eq} = 65,90 \text{ N.m}$.

Os dados utilizados não são estáticos, a rotação por exemplo irá ser alterada com frequência, dessa forma iremos considerar um alcance maior com um fator de correção de 1,1 (10%) que o calculado para o ponto de operação acima.

Por fim, as condições oferecidas à bancada fazem o modelo não-elástico ser o mais indicado para esse projeto. Os acoplamentos permanentes não-elásticos compensam o desalinhamento radial, axial e angular, porém são torcionalmente rígidos, não absorvem choques e vibrações. Dessa forma, esses acoplamentos são capazes de manter o sincronismo entre os dispositivos acoplados.

Será utilizado nesse projeto o acoplamento mecânico flexível não-elástico ADS que transmitem grandes potências, são facilmente encontrados no mercado pelos principais fabricantes e além disso apresentam as medidas de furo que atendem a demanda necessária. A Figura 16 representa um exemplo do acoplamento referido acima.



Figura 16 – Acoplamento mecânico não-elástico ADS

Fonte: Kalatec (2017)

4.4 Funcionamento conjunto da Bancada

Após dimensionar todos os sensores e componentes adicionais da bancada, é apresentada da Figura 17 o esquema completo da bancada de instrumentação aqui proposta.

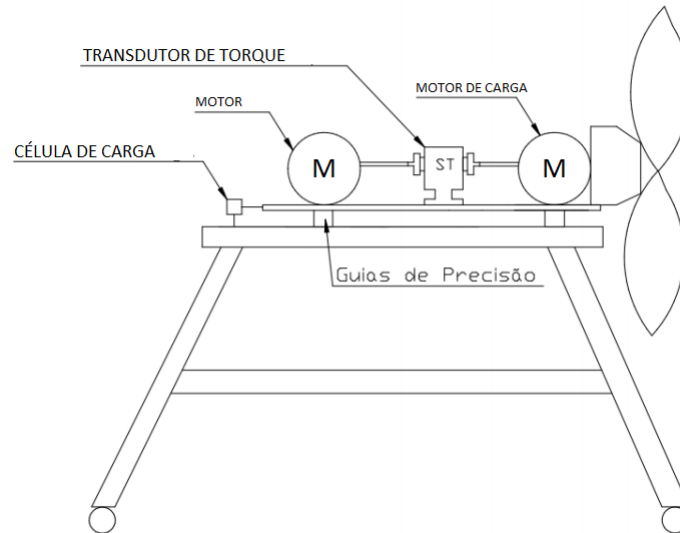


Figura 17 – Bancada de instrumentação completa

Fonte: Autor

O funcionamento da bancada pode ser evidenciado com a movimentação da bancada superior que compreende o motor, o transdutor de torque e o gerador decorrente da força de empuxo gerada pelo giro da hélice. Dessa maneira, a célula de carga é atuada e é feita a medição decorrente à mudança de empuxo. Além disso, na bancada superior em análise estática, o transdutor de torque faz a medição do torque imposto pelo motor elétrico.

Ambos os parâmetros são monitorados como dito nos capítulos anteriores por um sistema de medição disposto à partir de um CLP exibido em um programa de avaliação.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A propulsão híbrida promete ser o futuro de todos os meios de locomoção em massa devido grande parte à sua economia e sustentabilidade. O ramo compreende o panorama mais complexo devido ao dimensionamento do grupo propulsor e escala que se espera alcançar. Portanto, todo estudo relacionado à propulsão aeronáutica híbrida contribui para a possibilidade de atendimento dessa demanda latente. O trabalho aqui tratado visou projetar a instrumentação da bancada com o objetivo de monitor e analisar indicadores com relação a propulsão aeronáutica.

O grande desafio foi a adaptação dos sensores comuns do mercado à um novo conceito de bancada de teste sem a necessidade de mudança na estrutura da mesma. O projeto aqui tratado complementa outros trabalhos de conclusão de curso do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora a serem desenvolvidos no futuro.

Seguindo as metodologias de escolhas estipuladas previamente, foi possível selecionar os transdutores de força e de torque, além da escolha da tipologia ideal dos acoplamentos mecânicos. O transdutor de força a ser utilizado na bancada de instrumentação será o modelo U3 com capacidade de 200 kN de carga. Em segundo lugar, o modelo T22 com capacidade torcional de 500 $N.m$ foi definido como o transdutor de torque ideal. Ambos os transdutores são comercializados pelo fornecedor HBM. Além disso, chegou-se à conclusão que o modelo de acoplamento mecânico flexível não-elástico ADS é o ideal para o projeto.

As metodologias apresentadas neste trabalho podem ser utilizadas para diferentes configurações dos parâmetros de entrada de acordo com as especificações dos equipamentos do projeto desejado. Dessa maneira, é possível selecionar os dispositivos apropriados para a bancada de instrumentação ideal.

Os dispositivos aqui selecionados serão aplicados na bancada de instrumentação do projeto acadêmico nomeado "GCEME" do departamento de Engenharia Elétrica e Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora. Dessa forma, os dados utilizados para cálculo dos parâmetros aqui tratados são referentes aos equipamentos utilizados neste projeto.

Dessa maneira, conclui-se que a seleção dos dispositivos de uma bancada de instrumentação levam em consideração diversos parâmetros que devem ser previamente definidos de forma assertiva. Assim, é essencial a utilização das metodologias corretas de acordo com a disponibilidade de recursos financeiros, dos parâmetros de entrada e das condições de operação do projeto.

REFERÊNCIAS

- AIRBUS. **Airbus, Rolls-Royce, and Siemens team up for electric future Partnership launches E-Fan X hybrid-electric flight demonstrator**. 2017. Acesso em: 05 JAN. 2018. Disponível em: <<http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/11/airbus-rolls-royce-and-siemens-team-up-for-electric-future-par.html>>.
- ALMEIDA, Cássio Danelon de. Anteprojeto de um sistema de propulsão elétrico híbrido para uma aeronave agrícola. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.
- ANDERSON, John D. **Aircraft Performance and Design**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1999.
- ATAG. **Facts and Figures**. 2016. Acesso em: 04 JAN. 2018. Disponível em: <<https://www.atag.org/facts-figures.html>>.
- BARBOSA, João Paulo. **Elementos de Transmissão: Acoplamentos**. [S.l.]: Instituto Federal do Espírito Santos, 2015.
- DIEHL, W. **Static Thrust of Airplane Propellers - NACA Technical Report 447**. [S.l.]: NASA, 1932.
- E-MOTORS, Emrax Innovative. **User's Manual for Advanced Axial Flux Synchronous Motors and Generators**. [S.l.], 2017. Acesso em: 21 ABR. 2018. Disponível em: <http://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user_manual_for_emrax_motors.pdf>.
- ELÉTRICA, Saber. **Motores Elétricos e seus Princípios Fundamentais**. 2016. Acesso em: 20 MAR. 2018. Disponível em: <<https://www.sabereletrica.com.br/inverter-rotacao-motores-eletricos>>.
- EMADI., Eshanie; Gao;. **Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles – Fundamentals, Theory and Design**. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- FIGLIOLA, Richard. **Teoria E Projeto Para Medicões Mecânicas**. [S.l.]: LTC, 2007.
- GOMES, Rodrigo Mourão. Estudo sobre a tração fornecida por hélice mono-pás. Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- HBM. **T22 Torque Transducer**. [S.l.], 2017. Acesso em: 05 MAI. 2018. Disponível em: <http://www.disensors.com/downloads/products/T22%20Torque%20Transducer_325-.pdf>.
- HBM. **U3 Force Transducer Datasheet**. [S.l.], 2017. Acesso em: 05 MAI. 2018. Disponível em: <<https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/b0537.pdf>>.
- HEAD, Adam. **Conceptual Design and Simulation of a Microturbine; An Electric Car Range Extender Application**. [S.l.]: The University OF Queensland, 2011.
- HEIMER. **Microturbina Capstone**. 2016. Acesso em: 15 Mar. 2018. Disponível em: <<http://heimer.com.br/v4/br/microturbinas.html>>.
- HUSAIN, Iqbal. **Electric and Hybrid Vehicles – Design Fundamentals**. [S.l.]: CRC Press, 2003.

- KALATEC. **Acoplamentos**. 2017. Acesso em: 19 MAI. 2018. Disponível em: <<http://www.kalatec.com.br/wp-content/uploads/2014/12/Acoplamentos-300x189.jpg>>.
- KINGSLEY, Fitzgerald;. **UMANS. Máquinas Elétricas**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2003.
- MARTINS, Cristiane Aparecida. Lay-out de aerofolio. 2017.
- MICROTURBINE, Capstone. **Capstone C30**. [S.l.], 2017. Acesso em: 02 FEV. 2018. Disponível em: <<https://www.capstoneturbine.com/products/c30>>.
- NAIT. **INSTRUMENTATION ENGINEERING TECHNOLOGY**. 2017. Acesso em: 25 JAN. 2018. Disponível em: <http://www.nait.ca/program_home_15626.htm>.
- OMEGA. **Célula de Carga**. [S.l.], 2017. Acesso em: 20 MAR. 2018. Disponível em: <<https://br.omega.com/prodinfo/celulas-de-carga.html>>.
- PHILIPS, W.F. **Mechanics of Flight**. [S.l.]: John Wiley e Sons, Inc., 2009.
- PORTNOI, Marcos. **Extensometria**. 2001. Acesso em: 14 MAI. 2018. Disponível em: <<https://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>>.
- REDDY, LINDEN;. **Handbook of Batteries**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2001.
- SCHICKER RAINER; WEGENER, Georg. Measuring torque correctly. HBM, 2017.
- SCHOMANN, Joachim. Hybrid-electric propulsion systems for small unmanned aircraft. Technische Universität München, 2014.
- WARNER, E. **Airplane Design - Aerodynamics**. [S.l.]: McGraw Hill, 1927.