

Projeto de Pesquisa apresentado à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para a titulação de Mestre em Engenharia, da Dissertação de Mestrado em "Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha e Aeronaves MAV (Micro Air Vehicles)" ou de Mestre em Ciências, dentro do Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica do ITA.

Valter Barbosa Junior

DINÂMICA DE VOO DE SISTEMAS BIOLÓGICOS: A ABELHA

Prof. Orientador

Donizeti de Andrade,

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
(ITA)

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”



Figura 1: Fotografia da Abelha em pouso

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	3
2. HIPÓTESE	14
3. JUSTIFICATIVA	19
4. OBJETIVO	68
5. PRODUTO ESPERADO	72
6. CONCLUSÕES	347
REFERÊNCIAS	348

1. INTRODUÇÃO

Este texto apresenta o estudo da Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha.

Esta tese permite acrescentar ao Processo de Desenvolvimento de Engenharia Aeronáutica uma reconstrução dos modelos matemáticos de aerodinâmica, pois habilita a utilização mais intensa do uso dos coeficientes de arrasto em pró da diminuição do uso dos coeficientes de sustentação. Este aumento de arrasto em declínio da sustentação está diretamente relacionado com a capacidade de pressurizar a atmosfera contra uma superfície de ataque que se mova para baixo em detrimento de uma asa, cuja borda de ataque se mova para cima.

Os coeficientes de arrasto sofrem modificações dinâmicas ao longo do movimento das asas nas abelhas. O coeficiente de sustentação é utilizado de forma alternada em relação ao coeficiente de arrasto, ou seja, o coeficiente de arrasto é maior quando a asa desce e menor quando a asa sobe. Alternando-se desta forma o coeficiente de arrasto impulsiona a abelha para cima quando o coeficiente de arrasto é maior; e o coeficiente de arrasto é menor quando a asa sobe.

As asas do sistema biológico das abelhas compõem um novo Modelo Matemático; modelo este que será discutido longo desta dissertação. Este estudo permite a análise de Sistemas de decolagem e pouso na vertical, uma vez que o sistema biológico das abelhas voa tanto em condição pairada e também conseguem decolar e pousar de maneira VTOL (Vertical Take Off and Landing: decolagem e pouso na vertical).

Além da capacidade de decolagem e pouso VTOL, os sistemas biológicos das abelhas também permitem um comportamento de grande desempenho, onde as abelhas conseguem mudar rapidamente de direção e sentido; e também atingem acelerações lineares em proa e laterais de forma intensa; sendo tanto maior quando comparadas às aeronaves de construção humana, tanto nos veículos de asa fixa quanto nos veículos de asa rotativa.

O Modelo Matemático estudado nesta dissertação permite a análise do sistema biológico das abelhas, incluindo a análise dos exoesqueletos e tecidos das asas; malhas biológicas; tecidos orgânicos; modelos geométricos; e aerodinâmico das asas.

Dentre as funções biológicas, físicas e tecnológicas estudadas nesta dissertação, encontram-se os seguintes temas:

Sensores Miniaturizados [2], Redes Neurais, Equipamentos Autônomos, Robôs, Conversão Foto-Artificial, Engenharia de Sistemas Naturais [3], Sistemas Sensoriais, Processos Neurais,

Imagem e Visão, Ressonância Cognitiva, Memória e Aprendizado, Mecanismo de Foto-deteção, Eletrônica Biomolecular, Sistema de Navegação, Sensor de Posição e Orientação, Sonar, Audição, Deteção Acústica, Gravidade, Algoritmo de Navegação, Vibração, Propulsão, Sensor Biomecânico, Equilíbrio, Sistema de Controle, Velocidade / Aceleração, Velocidade do Vento, Giroscópios, Eletromagnetismo, Aerodinâmica, Sistemas Estruturais, Mecanismos, Articulações, Rigidez, Atuadores, Adaptação, Conversão e Armazenagem de Energia, Reconhecimento de Padrões, Rastreamento de Objetos, Comunicação, Pesquisa para Futuro [3], Estruturas, Processos de Alta precisão, Arquitetura da Natureza, Contribuição Biônica para a Engenharia, Abordagem Interdisciplinar, Novos Algoritmos, Módulos Eletrônicos análogos, Representação de sinais, Efeitos espaço-temporais, Mecanismo de Adaptação, Interface homem-máquina, Sensoriamento e Motor, Sistema de visão computacional baseado em modelos animais, Controle Distribuído, Novas formas de processamento de informação, Projeto para recepção de moléculas, Física da Interface biológica, Bioacelerômetro, Novos algoritmos, Sistemas de Mensuração e Controle, Integração e Amplificação Biológica, Representação de sinais, Sistema de tolerância a falhas, Visão Computacional (continuação), Transmissão de informação e telemetria, Processamento Paralelo com neurônios artificiais sofisticados, O Problema da Asa Flapeada (em batimento) [4], O Problema da Energia e da Escala, Potência disponível e potência requerida para voo flapeado (sob batimento), Baixo Número de Reynolds e Performance do Aerofólio, Cinemática de Voo Flapeado, Frequência e Amplitude, Máxima e mínima frequência de flap, Ângulo de Ataque, Morfologia de Controle de Fluxo e Estratégia de Voo, Redução de Arrasto e Ruído, Aerodinâmica do Voo Flapeado, Aerodinâmica [5], Aerodinâmica em 3-D, Sensores, Atuadores e Tecnologia de Controle, Acoplamento Flúidico / Estrutural / Acústico Completo, Estruturas Inteligentes para Redução de Ruído, Capacidade de Predição de Ruído, Testes baseados em fenômenos de fluxo, Micro e Nano sensores e sistemas de medição, Análise Multidisciplinar, Engenharia de Sistemas, Sistemas de Informação, Sistemas Eletro-ópticos, Sistemas de Sensores e Atuadores, Sistemas Mecânicos, Sistemas de Veículos de Voo, Processos de Fabricação, Ambiente de Testes, Equipes de Pesquisa [5], Aeronáutica, Marinha, Exército, Agência de Projetos de Pesquisa e Defesa Avançada (DARPA), Escritório de Pesquisa Naval (ONR), Centro de Armas Navais sub oceanos (NUWC), Laboratório de Pesquisa Naval (NRL), Escritório de Pesquisa Científica da Força Aérea (AFOSR), Laboratório de Pesquisa da Força Aérea (AFRL), Escritório de Pesquisa do Exército, Laboratórios de Pesquisa da NASA, Pesquisas Potenciais [5], Materiais, Estruturas, Controle e Navegação, Aeronáutica, Sistemas Biomiméticos, Pesquisa de Projeto Morfológicos [6], Morfologia Estrutural Adaptativa, Superfície Estrutural Adaptativa Multifuncional, Controle Micro-Aéreo Adaptativo, Controle de Campo de Fluxo Global, Sistemas de Voo Inspirados Biologicamente, Aprendendo com a Natureza, Materiais Inteligentes Revolucionários, Materiais Biomiméticos, Nanotecnologia, Otimização de Controles Eletrônicos, Controle Retroalimentado usando Atuadores Piezoelétricos, Dinâmica e Controle de Veículos Micro-Aéreos com Ressonância de Flaps, Pesquisa inspirada em Micro-Voos Biológicos [7], Veículo Micro-Aéreo com asa fixa aeroelástica, Conceito de Asa Flexível, Aerodinâmica Elástica, Controle e

Estabilidade, Ressonância Baseada em Veículo Micro-Aéreo Flapeado, Conceito Estrutural para Asas Flexíveis, Geração de Vibração causado pelo Movimento em Flap, Conceitos de Mecanização e Controle para Veículos Micro-Aéreos inspirados Biologicamente [8], Testes de voo para asas mórficas [9], Definição de uma arquitetura mórfica usando mecanismos específicos, Desenvolver um algoritmo de Projeto otimizado para mecanismo de voo, Fabricar e Integrar o mecanismo de voo, Comparar a performance do mecanismo com a de um ser vivo real.

Todas estas funções possuem um potencial de pesquisa enorme pois permitem que cada uma destas características sejam estudadas e desenvolvidas para formação de novas tecnologias. Assim há potencial de pesquisa em todas estas funções que permitem não somente modelar princípios matemáticos, mas também construir MAV (Veículos Micro-Aéreos) que se utilizem destas funções e tecnologias. Quanto maior seja o número de pesquisadores em uma hipotética e futura Engenharia de Natureza, maior será o cabedal de tecnologias que venham a derivar de modelos biológicos, modelos estes que a dinâmica das abelhas permite iniciar esta suposta cadeira de Engenharia do futuro.

Elencando e pesquisando todas estas funções biofísicas anteriormente citadas, observa-se que surge um enorme campo de atuação para desenvolvimento de novas tecnologias, e novas biotecnologias.

Este conjunto de biotecnologias que venham a ser desenvolvidas e implementadas permitem que haja um grande universo que atue não somente na área de dinâmica de voo, mas também nos oceanos, nas montanhas, nos lagos, nos rios, nas florestas, nos desertos e nos ares.

Os seres vivos possuem um eficaz modelo de adaptação para diferentes ambientes; somente esta capacidade de adaptação dos seres vivos já justifica anos de pesquisa e de desenvolvimento e implementação de tecnologias. Quanto mais agressivo seja o ambiente, mais se justifica estudar a capacidade de seres vivos de se adaptar e de se flexibilizar para viver nestes ambientes hostis.

Nesta tese de iremos focar somente na biologia, nos recursos, e na dinâmica de voo das abelhas; e também sobre as potenciais aeronaves robôs MAV que venham a imitar a tecnologia de voo das abelhas.

Esta tese versa sobre todas as funções expressas anteriormente com aplicação focada no voo das abelhas e no voo dos MAV que imitam abelhas.

A seguir descreve-se condições e características biológicas das abelhas:

Abelhas são insetos voadores, conhecidos pelo seu papel na polinização. Pertencem à ordem **Hymenoptera**, da superfamília **Apoidea**, subgrupo **Anthophila**, e são aparentados das vespas e formigas.

O representante mais conhecido é a *Apis mellifera*, oriunda do Velho Mundo, criada em larga escala para a produção de mel, cera, própolis, geleia real e veneno (Apitoxina). As espécies de abelhas nativas das Américas (Novo Mundo) não possuem ferrão. A maioria destas pertence à tribo Meliponini.

Os indivíduos adultos se alimentam geralmente de néctar e são os mais importantes agentes de polinização. As abelhas polinizam flores de cores monótonas, escuras e pardacentas (todos os tipos de flores).

Uma abelha visita dez flores por minuto em busca de pólen e do néctar. Ela faz, em média, quarenta voos diários, tocando em 40 mil flores. Com a língua, as abelhas recolhem o néctar do fundo de cada flor e guardam-no numa bolsa localizada na garganta. Depois voltam à colmeia e o néctar vai passando de abelha em abelha. Desse modo a água que ele contém se evapora, ele engrossa e se transforma em mel. A maioria das abelhas transporta uma carga eletrostática, que as ajuda na aderência ao pólen.

As abelhas têm cinco olhos. São três pequenos no topo da cabeça e dois olhos compostos, maiores, na parte frontal.

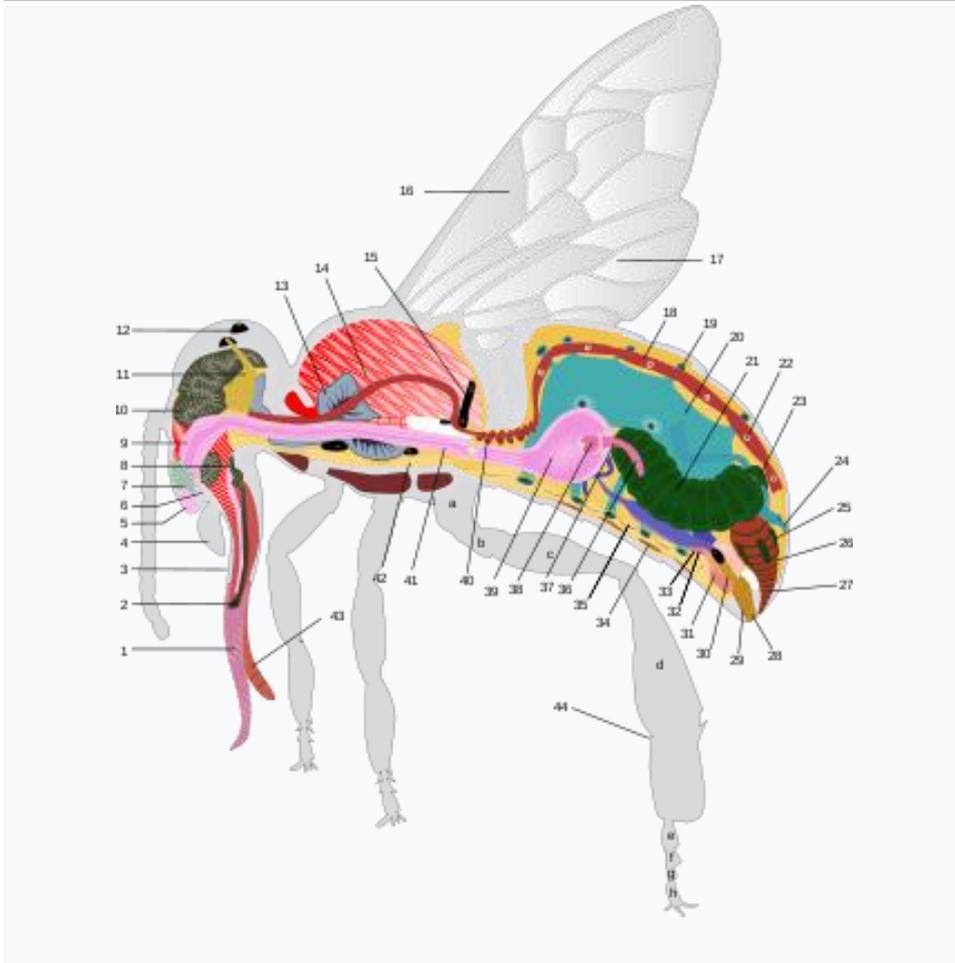
Uma abelha produz cinco gramas de mel por ano. Para produzir um quilo de mel, as abelhas precisam visitar 5 milhões de flores e consomem cerca de 6 a 7 gramas de mel para produzirem 1 grama de cera

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Uma colmeia abriga de 60 a 80 mil abelhas. Tem uma rainha, cerca de 400 zangões e milhares de operárias. Se nascem duas ou mais rainhas ao mesmo tempo, elas lutam até que sobre apenas uma rainha. A abelha-rainha vive até 5 anos, enquanto as operárias vivem de 28 a 48 dias. Apenas as abelhas fêmeas trabalham. Os machos podem entrar em qualquer colmeia ao contrário das fêmeas. A principal missão dos machos é fecundar a rainha. O zangão também tem a função de proteger a colmeia de outros insetos que possam ameaçá-la. Apesar de não possuir ferrão, as suas presas servem para atacar outros insetos que tentem invadir a colmeia, como vespas ou formigas. A rainha voa o mais que pode e é fecundada pelo macho que conseguir ir até ela, esse voo se chama: voo nupcial. Depois de cumprirem essa missão em particular, eles não são mais aceitos na colmeia. No fim do verão, ou quando há pouco mel na colmeia, as operárias caem.

A anatomia da abelha é descrita abaixo:

Anatomia:



Legenda da Anatomia da Abelha

1 - Língua (ou Probóscide)

2 - Orifício do tubo excretor da glândula da mandíbula posterior

3 - Mandíbula inferior

4 - Mandíbula superior
5 - Lábio superior
6 - Lábio inferior
7 - Glândula da mandíbula frontal (glândula mandibular)
8 - Glândula da mandíbula posterior
9 - Abertura da boca
10 - Glândula da faringe
11 - Cérebro
12 - Ocelos
13 - Glândulas de salivares
14 - Músculos torácicos
15 - Postfragma
16 - Asa frontal
17 - Asa posterior
18 - Coração
19 - Estigmas

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

20 - Saco aéreo
21 - Intestino médio (intestino quiloso, estômago)
22 - Válvulas cardíacas
23 - Intestino delgado
24 - Tubos de Malpighi
25 - Glândulas rectais
26 - Bolsa de excrementos
27 - Ânus
28 - Canal do ferrão
29 - Bolsa de veneno
30 - Glândulas de veneno
31 - Arcos do canal do ferrão
32 - Pequena glândula
33 - Vesícula seminal
34 - Glândulas ceríferas
35 - Gânglios abdominais

36 - Tubo da válvula
37 - Intestino intermédio
38 - Copa (entrada do estômago)
39 - Bolsa do mel (bucho)
40 - Aorta
41 - Tubo digestivo
42 - Cordão neuronal
43 - <i>Palpe labia</i>
44 - Metatarso

1.1) Pernas

A abelha, como todo o inseto, tem três pares de pernas. Utiliza o primeiro para limpar as antenas, protegendo-as da poeira. O segundo serve de apoio para o seu corpo, e o terceiro par, chamado de *patas coletoras*, serve para mover pólen. Na tuba das patas coletoras fica o lavatório para o óleo: *corbícula*, espécie de pote. Ainda no terceiro par, fica o "escorpião", com o qual a abelha recolhe o pólen e, trocando as patas, deposita-o com o centro na corbícula direita e, com a direita na corbícula central.

1.2) Língua

A língua, ou lígula move-se num canal formado pelas maxilas e os palpos labiais, terminando num tufo de pelos que, como uma esponja, absorve o néctar da flor

1.3) Mandíbula e maxilar

São órgãos responsáveis por amassar as escamas de cera que a abelha expele do abdômen, utilizadas depois para construir os favos. Têm também a função de abrir as anteras das flores para extrair o pólen, varrer a colmeia e mutilar os inimigos.

1.4) Antenas

Órgãos do olfato e do tato são extremamente sensíveis. As abelhas, farejando com as antenas na escuridão, são capazes de construir favos perfeitamente geométricos

1.5) Ferrão

O ferrão serve para injetar toxina (apitoxina) no corpo do inimigo. Somente as operárias o utilizam para defesa ou ataques. A rainha possui uma espécie de ferrão que é utilizado para manipular os ovos na postura ou duelar com outra rainha, e os zangões não possuem ferrão. A operária, ao ferocar um humano, deixa o ferrão na vítima, pois o mesmo é disposto de pequenos espinhos no sentido oposto, como se fossem uma seta, daí fica preso à pele. E junto ao ferrão, fica o intestino da operária, que com sua perda morrerá em seguida

1.6) Abdômen e tórax

São os órgãos que contém os aparelhos: digestivo (tubo faringiano, o esôfago e o estômago ou papo); o circulatório e o respiratório (o sangue é incolor e circula com as contrações do coração, pela *aorta* e pelo *vaso dorsal*. Há ainda os estigmas - orifícios por onde respiram os insetos.); o aparelho de reprodução masculino (os órgãos sexuais masculinos terminam na face dorsal do penúltimo anel da crosta) e o feminino (um par de ovários, um oviduto e um receptáculo seminal).

1.7) Órgãos da visão

Os olhos compostos são dois grandes olhos localizados na parte lateral da cabeça. São formados por estruturas menores denominadas omatídeos, cujo número varia de acordo com a casta, sendo bem mais numerosos nos zangões do que em operárias e rainhas (Dade, 1994). Possuem função de percepção de luz, cores e movimentos. As abelhas não conseguem perceber a cor vermelha, mas podem perceber ultravioleta, azul-violeta, azul, verde, amarelo e laranja. Os olhos compostos - um de cada lado da cabeça de superfície hexagonal, permite uma visão panorâmica dos objetos afastados, aumentando-os 60 vezes.

Os olhos simples ou ocelos são estruturas menores, em número de três, localizadas na região frontal da cabeça formando um triângulo. Não formam imagens. Têm como função detectar a intensidade luminosa.

1.8) Asas

As asas são formadas por duas membranas superpostas, reforçadas por nervuras ramificadas. Os pares de trás são menores e munidos de ganchinhos, com os quais a abelha, durante o voo, prende as duas asas formando uma só

2. HIPÓTESE

A análise e estudo do Sistema Biológico das Abelhas permitem um ganho de potencial para análise do comportamento dinâmico de aeronaves construídas pelo homem, uma vez que estes sistemas possuem características tanto de VTOL quanto de navegabilidade altamente intensa, nas quais rápidas acelerações, desacelerações; execuções rápidas de curvatura; além de rápidas subidas e descidas.

Tratamos como hipótese o potencial de desenvolvimento de novas tecnologias aeronáuticas quando se observa questões específicas do sistema de voo das abelhas. A hipótese que tentamos sustentar se enquadra na concepção de que ao estudarmos o modelo de voo das abelhas, poderemos aplicá-lo a novos conceitos e novos modelos de aeronaves feito pelo homem.

Partimos da hipótese que ao estudarmos a natureza poderemos compreender tais modelos e aplicá-los sistematicamente em novas aeronaves tanto de grande porte quanto em aeronaves MAV (Veículos Micro-Aéreos).

Ao estudarmos a Natureza e analisarmos tecnicamente o princípio de voo das abelhas, poderemos compreender e criar novas concepções, novos controles, novos sistemas de voo, novos modelos de aerodinâmica, novos materiais, etc.

Assim, esta dissertação não é completa em si mesma, mas trata-se de um convite para engenheiros aeronáuticos, químicos, mecânicos, eletrônicos e de software para virem a repensar seus estudos específicos, convidando-os para repensar através dos modelos da natureza seus

princípios de estudos matemáticos, físicos e tecnológicos.

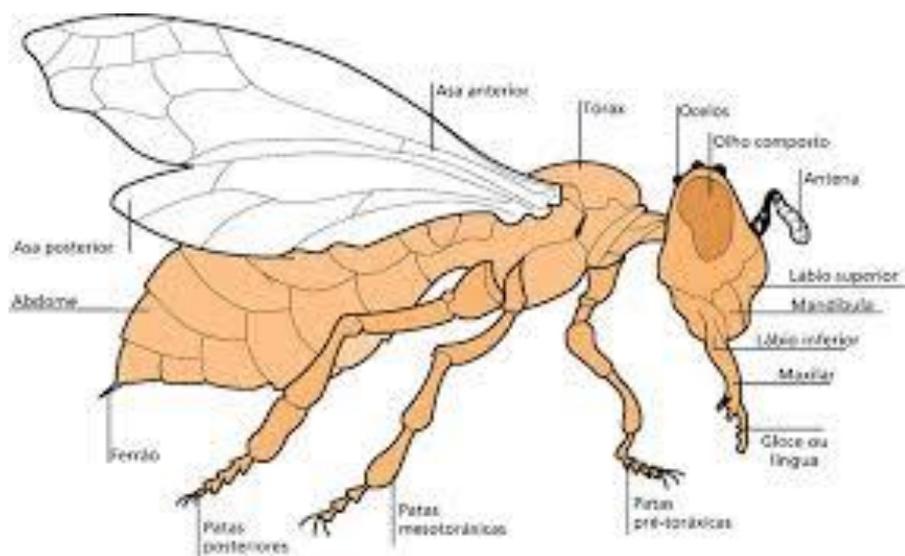


Figura 2: Partes anômicas das abelhas

Assim, pensamos que o estudo de uma hipotética cadeira de Engenharia da Natureza que venha a estudar modelos matemáticos de comportamento da mesma permitiria um avançado conjunto de ciência e de tecnologia que hoje ainda se classifica como ainda impensável. Quanto mais se estuda os fenômenos físicos da biologia marinha, terrena e aérea, mais se tem como recursos a compreensão de que modelos biológicos podem ser aplicados por tecnologias desenvolvidas pelo homem.

Sob esta hipótese de se desenvolver e implementar uma cadeira de Engenharia da Natureza, os cientistas biólogos, anatomistas, fisiologistas, físicos, químicos, biofísicos, bioquímicos, matemáticos e engenheiros mecânicos, eletrônicos e de computação se capacitariam para constituir uma equipe de trabalho multidisciplinar, pois somente com um perfil de profissionais

multidisciplinar poder-se-ia conceber esta nova cadeira de engenharia, com um potencial de atuação absolutamente enorme.

2.2) Sistema de defesa

A abelha operária (ou obreira), preocupada com sua própria sobrevivência e encarregada da proteção da colmeia como um todo, tem um ferrão na parte traseira para ataque em situações de suposto perigo. Esse ferrão tem pequenas farpas, o que impede que seja retirado com facilidade da pele humana.

Quando uma abelha se sente ameaçada, ela utiliza o ferrão no animal que estiver por perto. Depois de dar a ferroada, ela tenta escapar e, por causa das farpas, a parte posterior do abdômen onde se localiza o ferrão na maioria das vezes fica presa na pele do animal e, em alguns casos, a abelha perde uma parte do intestino, morrendo logo em seguida. Já ao picar insetos, a abelha muitas vezes consegue retirar as farpas da vítima e ainda sobreviver.

Os órgãos prejudicados das abelhas em caso de o ferrão ficar preso na vítima e levar órgãos juntos variam de intestino até o coração.

A ferroada da abelha no ser humano é muito dolorosa, e a sensação instantânea é semelhante a de levar um choque de alta voltagem. Seu ferrão é unido a um sistema venenoso que faz com que a pele da vítima inche levemente na região (cerca de 2 cm ao redor), podendo ficar avermelhada, dolorida e coçando por até dois dias.

Apesar disso, o veneno (baseado em Apitoxina) não causa maiores danos. Esse veneno é produzido por uma glândula de secreção ácida e outra de secreção alcalina embutidas dentro do abdômen da abelha operária. O veneno, em concentração visível, é semitransparente, de sabor amargo e com um forte odor. Pode ser usado eventualmente com valor terapêutico e tem alguns efeitos positivos na região em que foi injetado. O veneno pode ser também um perigo grave ou mortal em grande quantidade para quem é alérgico à sua composição.

O "veneno" da abelha é cumulativo, ou seja, depois de entrar no organismo da vítima, não mais é retirado. Levar ferroadas esporadicamente não trará prejuízos, mas pode ser um perigo para quem trabalha em apicultura, pois a apitoxina causa problemas nas articulações, quando alcança um maior volume no organismo.

A vida das abelhas

As abelhas são insetos que vivem em sociedades homeotípicas (com distinção de funções dentro da sociedade). Elas são conhecidas há mais de 40.000 anos e as que mais se prestam para a polinização, ajudando enormemente a agricultura, produção originária de mel, geleia real, cera e própolis, são as abelhas pertencentes ao gênero *Apis*. Essas abelhas são originalmente do Polo Norte, porém com o Aquecimento Global se mudaram para o Polo Sul. Consequentemente, com essa longa travessia algumas acabaram se espalhado pelo mundo. [5]

Inseto laborioso, disciplinado, a abelha convive num sistema de extraordinária organização: em cada colmeia existem cerca de 80.000 abelhas e cada colônia é constituída por uma única rainha e cerca de 400 zangões.

Abelha-rainha

A abelha rainha é personagem central e mais importante da sociedade. Seu tamanho é quase duas vezes maior do que o das operárias, e sua única função do ponto de vista biológico é a postura de ovos e manter a ordem na colmeia usando ferormônios que só ela possui. Única fêmea com capacidade de reprodução, a rainha nasce de um ovo fecundado, e é criada numa célula especial - diferente dos alvéolos hexagonais que formam os favos - uma cápsula denominada realeira, na qual é alimentada pelas operárias com a geleia real, produto riquíssimo em proteínas, vitaminas e hormônios sexuais. A geleia real é o alimento único e exclusivo da abelha-rainha, durante toda sua vida. A partir do nono dia, ela já está preparada para realizar o seu voo nupcial, quando será fecundada pelos zangões. Caso apareça outra rainha na colmeia, ambas lutarão até que uma delas morra.

No entanto, um estudo recente demonstra que as abelhas do Cabo na África do sul são capazes de realizar uma reprodução assexuada, nesse caso as abelhas operárias produzem ovos fecundados com seu próprio DNA.

O pouso das abelhas

As abelhas conseguem pousar com segurança em qualquer ângulo de uma superfície.

Como?

Analise o seguinte: Para fazer um pouso seguro, a abelha precisa voar cada vez mais devagar, até atingir uma velocidade quase zero antes de chegar à superfície. O mais lógico seria a abelha calcular a velocidade do voo e a distância do alvo. Daí ela teria que reduzir a velocidade de acordo com esse cálculo. Mas isso é difícil para a maioria dos insetos. Seus olhos não conseguem medir distâncias, porque são muito próximos um do outro e não tem a capacidade de se ajustar para focalizar algo.

Esse tipo de visão é diferente da visão dos humanos. Nossa visão é binocular, ou seja, conseguimos calcular a que distância um objeto está. No caso das abelhas, parece que elas simplesmente percebem que um objeto fica “maior” à medida que se aproximam dele. Quanto mais rápido a abelha se aproxima, mais rápido o objeto “cresce”. Experiências feitas na Universidade Nacional Australiana mostram que a abelha vai diminuindo a sua velocidade até que o objeto pareça crescer num ritmo constante. Antes de pousar no objeto, a abelha reduz a velocidade a praticamente zero. Assim, ela consegue fazer um pouso seguro.

Uma revisa científica dos Estados Unidos disse: “Essa estratégia de pouso é simples e pode ser aplicada em várias situações. É ideal para ser usada em sistemas de direção de robôs voadores.”

O que você acha? Será que o pouso das abelhas é resultado de evolução? Ou teve um projeto?

3. JUSTIFICATIVA

Os estudos do sistema biológico das abelhas e a construção dos modelos matemáticos que representam aerodinamicamente seu comportamento permitem a análise e a aplicação em equipamentos futuros, tanto militares quanto civis, com capacidade de navegação e de manobra com intenso potencial; voos estes que se apresentam absolutamente flexíveis, dinâmicos e rápidos comparados à dinâmica de voo das aeronaves construídas atualmente pelo homem.

Este estudo permite uma reanálise dos modelos aerodinâmicos tanto de asa fixa civil (subsônica), quanto para asa fixa militar (supersônica) e também de asa rotativa, uma vez que a análise de comportamento dos sistemas biológicos das abelhas permite capacidades os quais modelos humanos tradicionais não atingem.

O modelo matemático, físico e tecnológico que justifica não somente esta tese, mas também todo um modelo de pesquisa e desenvolvimento por vir em engenharia e em ciência do futuro estão representados a seguir.

Pesquisa para Futuro [3]:

A Pesquisa para o Futuro envolve diversas áreas, entre elas estrutura, processos de precisão e arquitetura na natureza, eletroeletrônica, redes neurais, entre outros:

3.6.1 Estruturas:

As estruturas das abelhas são baseadas em corpo físico (tórax e abdômen), par de asas exteriores, par de asas posteriores, ferrão, 3 pares de patas, cabeça, par de olhos, par de antenas.

Quanto em relação a estruturas das asas, estas são sintéticas e comumente projetadas para espessuras de estruturas biológicas e acomodação de forças via controle de deformação. Pode-se observar princípios que nos irão desenvolver estruturas mais leves e mais resistentes. As estruturas das asas das abelhas são altamente resistentes à fadiga e também bastante flexível, pois de acordo com o ângulo de ataque momentâneo da asa, esta posiciona-se com uma flexibilidade específica de forma a manter estável a dinâmica média de voo para cima, para baixo, para frente, para trás e em guinada. As asas das abelhas são extremamente flexíveis e permitem um

comportamento dinâmico altamente exigente de esforço mecânico e de fadiga.

A estruturas do esqueleto do corpo e das asas das abelhas permite observar que a asa se apresenta muito resistente e também muito flexível. É interessante observar que o aumento da flexibilidade não compromete o ganho de resistência do esqueleto da asa demonstrada. Estamos falando de um par de asas exterior e um par de asas posterior. Ou seja, os pares de asa se posicionam de maneira a provocar o voo VTOL e também o voo pairado e o voo a frente e também o voo guinado. O voo VTOL utiliza as estruturas do par de asa exterior. O voo pairado também utiliza o comportamento de voo das estruturas do para de asa exterior. Já os voos a frente e os voos guinados, as abelhas se usufruem do par de asas posterior para criar o empuxo a frente ou o empuxo guinado.

Observa-se assim, que o comportamento dinâmico dos dois pares de asa (Asa exterior e asa posterior) atuam de forma inteligente e coordenada para criar os efeitos de deslocamento VTOL, pairado, à frente e guinado.

Deve-se observar que o voo das abelhas normalmente realiza-se de forma coletiva, ou seja, o enxame das abelhas move-se em conjunto, para cima, pairado, para baixo, à frente e guinado, ou seja a estrutura de antenas e sensores das antenas trabalham de forma conjunta para viabilizar a comunicação entre as abelhas de maneira a coordenar o voo coletivo.

Este modelo altamente complexo de comunicação através dos sensores auditivos e sensores eletromagnéticos faz com que as abelhas realizem sua missão de captação de pólen das flores para trazer este pólen para a colmeia seja regida de maneira a realizar uma tecnologia altamente sofisticada. Ou seja, o voo solo de uma única abelha é totalmente diferente do voo coletivo de um conjunto de abelhas e a estrutura tanto física dos esqueletos das asas exterior e das asas posterior em conjunto com os sistemas de antenas que coordenam o voo coletivo através destas estruturas.

Este modelo de voo coletivo pode e deve ser altamente estudado para viabilizar o aumento exponencial do número de aeronaves voando no espaço do planeta Terra. O crescimento exponencial somente será viável tecnicamente se tecnologias similares ao voo coletivo das abelhas sejam implementadas nas aeronaves do futuro, uma vez que o volume de aeronaves em voo está se tornando cada dia mais intenso.

Os modelos de dinâmica de sistemas e de controle coletivo de voo das aeronaves precisa sem qualquer sombra de dúvida, serem adaptados e melhorados para voo coletivo das aeronaves civis e militares em todo o mundo.

Em relação a estrutura das asas é fundamental perceber que os futuros MAV (Micro-Veículos Aéreos) precisam ter tempo de resposta altamente intenso e rápido, de forma que na aplicação dos MAV se torna necessários construir estruturas piezo-elétricas onde as estruturas mecânicas das asas devem ter um tempo de resposta muito alto onde sinais elétricos geram deformações de pressões mecânicas. Ou seja, dispositivos piezo-elétricos são necessários nas construções dos MAVs construídos pelo homem.

A princípio, um MAV hipotético que imite o voo das abelhas deve ter uma estrutura de energia de pequenas baterias de íon de lítio, um sistema de controle das asas exteriores para voo VTOL e pairado, um sistema de controle das asas posteriores para voo a frente e voo guinado, um sistema de medição do par de antenas para coordenar o voo coletivo através da recepção de sinal eletromagnético via Efeito Doppler, que mede a aproximação com frequências mais altas (sinais agudos) e mede o afastamento com frequências mais baixas (sinais graves).

A composição de duas antenas permite validar a direção em que o sinal de uma terceira abelha, do enxame, está emitindo, capacitando a abelha receptora do sinal para se afastar na direção oposta ao sinal recebido. Caso o sinal seja de afastamento, a abelha receptora poderá voar opcionalmente na direção do afastamento. Em relação ao conjunto da colmeia, ocorre um efeito dominó que executa uma onda de comportamento dinâmico do voo do conjunto como um todo, permitindo que não haja choques ou colisões entre as abelhas da colmeia.

A estrutura do par de olhos é altamente sensível, pois permite às abelhas localizar florais específicos através de cores que identificam a planta desejada. Além disso é impressionante como a abelha consegue voar dezenas de metros, localizar o floral desejado e voltar para a colmeia sem se perder. Esta capacidade deve ocorrer através de uma combinação entre o poder de visão do par de olhos, mais a ajuda da percepção eletromagnética e sônica do par de antenas e um hipotético sinal eletromagnético que pode vir a ser emitido pela abelha rainha.

3.6.2 Processos de Alta precisão:

Estruturas biológicas apresentam uma arquitetura precisa. Métodos atuais de manufaturas não podem alcançar esta precisão em 3-D. Para se atingir vantagens destas estruturas hierárquicas, podem-se desenvolver métodos de processamento que podem ser modelados segundo processos biológicos. Assim, as estruturas de alta precisão de fabricação das asas e das articulações exigem um processo específico que fornece ao mesmo tempo alta resistência à fadiga e alta flexibilidade mecânica sem danificar a estrutura das mesmas. As asas das abelhas precisam de ambas as características simultâneas, o que faz com que as asas tenham um comportamento mecânico bastante específico, eficiente e eficaz.

Observa-se que as geometrias das asas, tanto do par de asas exteriores, quanto do par de asas posteriores, são altamente precisas e simétricas. Para validar o arrasto para voo VTOL ou para voo pairado, verifica-se um alto grau de simetria e estas simetrias também são observadas no voo a frente e no voo guinado. Para executar o voo VTOL ambas as asas se comportam de maneira simétrica e simultânea e estas simetrias e simultaneidades se repetem no voo pairado. Quando se observa o voo a frente e o voo guinado a simultaneidade e a simetria se operam em relação ao batimento do par de asas posteriores.

Assim, tanto para o voo VTOL, quanto para o voo pairado, ou para os voos a frente e guinado, os pares de asas exteriores e posteriores operam de maneira simultânea e simétrica gerando arrasto vertical ou horizontal.

Os pares de asa operam de maneira a responder ao modelo de arrasto, onde a força de arrasto é proporcional à metade da densidade do ar, à velocidade de batimento das asas ao quadrado, à área das asas e ao coeficiente de arrasto do par de asas.

Quanto maior a velocidade de batimento das asas, maior será a força de arrasto tanto para o voo VTOL, quanto para o voo a frente e ou guinado. É interessante observar que o par de asas exteriores e o par de asas posteriores atuam criando um movimento simétrico e simultâneo seja

para cima, ou para frente. O par de asas exteriores e o par de asas posteriores operam unidos e flexivelmente simultâneos criando o comportamento unidos.

Estes batimentos dos pares de asas operam com altíssima precisão. Precisão esta que somente podem ser observadas na natureza. A natureza biológica das abelhas é verificada com uma geometria e um fluxo de batimento altamente simétricos e precisos. Precisos tanto em relação à geometria, quanto em relação à dinâmica do batimento. É interessante observar que o par de asas das abelhas possuem um movimento de batimento associado a um movimento de articulação e rotação. Os pares de asas batem gerando arrasto de cima e para baixo gerando um máximo de arrasto; e articulam-se e torcem para realizar um movimento vertical para cima gerando um mínimo de arrasto vertical. Esta composição trabalha para gerar um arrasto resultante máximo para cima e um arrasto resultante mínimo para baixo, gerando um vetor resultante maior para cima o que permite o voo VTOL e o voo pairado vencendo o peso gravitacional da abelha.

Um sistema MAV precisa ser desenvolvido com a capacidade de controlar o batimento para baixo, impulsionando o MAV para cima e para trás, impulsionando o MAV para frente ou para guinada. O sistema MAV precisa usar tecnologia de movimento piezo-elétrico para provocar o batimento das asas tanto exteriores quanto posteriores. O batimento piezo-elétrico permite trabalhar com altas velocidades e quanto maior a velocidade ao quadrado, maior será a força de arrasto, seja para cima, quanto para frente.

Assim uma aeronave MAV pode ao utilizar articulações piezo-elétricas trabalhar com altas velocidades de batimento das articulações e dos pares de asas, gerando assim um movimento VTOL, um movimento pairado, um movimento a frente e um movimento guinado com alta precisão e alta velocidade.

É importante observar que estes movimentos não possuem a mesma flexibilidade nem a mesma velocidade de operação quando se pensa em aeronaves fabricadas pelo homem. Somente aeronaves que imitem a natureza, podem ter um tempo de resposta tão veloz quanto um sistema biológico, no caso como o das abelhas.

Um MAV que venha a imitar o voo das abelhas, precisa ser capaz de trabalhar com a mesma precisão, ou com uma precisão semelhante.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Um modelo hipotético de uso de articulações piezo-elétricas é utilizado para imitar uma articulação nervosa dos pares de asas do sistema biológico das abelhas. Somente um sistema biológico de articulação de nervos pode ser imitadas utilizando articulações piezo-elétricas.

As articulações piezo-elétricas de um Sistema MAV devem permitir a dinâmica de articulação de um sistema de nervos que operam na articulação das asas do sistema biológico das abelhas.

Tanto a precisão de geometria quanto a precisão de dinâmica devem e precisam ser imitadas quando se fala de um sistema MAV que opera de maneira semelhante ao sistema biológico. Um sistema MAV tem que ser capaz de realizar o mesmo modelo de dinâmica de voo do sistema biológico que ele visa imitar, no nosso caso o sistema das abelhas.

A utilização de um sistema MAV de espionagem pode e deve ser capaz de realizar voo VTOL, voo pairado, voo a frente e voo guinado e fornecer informações para uma central receptora de sinais e de informações visuais e sonoras. Esta central deve ser capaz de receber os sinais a uma grande distância. No caso do voo das abelhas, estas são capazes de informar a grandes distâncias a existência ou não de pólen em determinada região onde ela fez sua pesquisa de voo. No caso de um MAV na sua missão de voo.

A precisão no envio das informações visuais e sonoras do voo de missão são relatadas para a central receptora, de maneira a poder informar ao sistema MAV uma correção de rota, uma correção de missão, ou mesmo uma modificação na missão em si. A precisão na capacidade de receber e enviar novas informações e novas missões é fundamental na aplicação dos Sistemas MAV, pois a correção de missão se torna imprescindível para a vida útil da aeronave MAV.

3.6.3 Arquitetura da Natureza:

Aprendizados sobre Projeto de Materiais Sintéticos. Utilização, por exemplo, de Exoesqueleto para fortalecer fibras em compósitos. A presença de exoesqueleto na natureza não se trata de um processo aleatório, mas sim, de um processo altamente inteligente, pois permite fornecer aos insetos e especificamente às abelhas um comportamento extremamente eficaz tanto em relação à dinâmica de voo, como também em relação à atuação diante de outros animais ferozes. A arquitetura da natureza deve ser estudada com o máximo de rigor possível, pois há muitas características mecânicas, químicas, físicas e dinâmicas de voo que podem ser aprendidas e compreendidas por nós seres humanos.

Na natureza observamos principalmente nos insetos a presença inteligente de esqueleto externo ou exoesqueleto. As abelhas não chegam a possuir um exoesqueleto porém ele possui como descrito na anatomia anterior uma série de partes anatômicas que executam funções biológicas, fisiológicas e anatômicas específicas. São elas descritas anteriormente na anatomia das abelhas. Toda natureza possui um tipo de arquitetura que se repete como um padrão biológico em todos os animais. São elas: 3 pares de patas (como na grande maioria dos insetos), 2 pares de olhos, 1 lábio superior, 1 lábio inferior, 1 língua, 1 tórax, 1 abdômen, 2 pares de asas (exterior, posterior). Estes padrões podem ser analisados como um modelo inteligente e padrão que ocorre em toda a natureza e em todos os animais e principalmente nos insetos. Este padrão pode e deve ser observado como um Modelo de Arquitetura da Natureza. Como que toda a Natureza respeitasse este padrão biológico e anatômico.

Trata-se de uma Arquitetura e um Modelo que se repete em toda a biologia animal e em toda biologia dos insetos. Esta Arquitetura e Modelo pode ser visto nos mamíferos, nas aves, nos répteis, nos anfíbios, nos peixes, nos insetos e também na espécie humana.

Com certeza absoluta, o modelo de Arquitetura da Natureza, com a repetição de padrões desde anatômicos internos até padrões de movimentação dinâmica externa, cabe observar que estes padrões não se repetem aleatoriamente, mas sim, há uma lógica anatômica e fisiológica que gera a repetição destes padrões.

Uma tecnologia de aeronaves MAV deve respeitar estes padrões e procurar copiá-los dentro de certas condições de tecnologias que se tornem viáveis.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Por exemplo, usar dois sensores visuais imitando o par de olhos para viabilizar a visão 3D e a visão de profundidade;

Deve usar 3 pares de patas, cada um com sua função fisiológica específica descrita na introdução: Utiliza o primeiro para limpar as antenas, protegendo-as da poeira.

Usa o segundo que serve de apoio para o seu corpo,

E usa o terceiro par, chamado de *patas coletoras*, serve para mover pólen.

Uma máquina MAV que imite as funções biológicas e fisiológicas das abelhas deve respeitar a “Inteligência da Arquitetura da Natureza” e passe a copiar estas condições físico-químicas da Natureza em si.

Uma aeronave MAV, deve possuir 2 pares de asas (1 par exterior e 1 par posterior), 1 par de olhos (para visão 3 D), 3 pares de patas (como descrito anteriormente), 1 estrutura fisiológica-mecânica que imite o equilíbrio do tórax e do abdômen, 1 par de antenas para leitura eletromagnética e sônica e um processador eletrônico para viabilizar a dinâmica de voo e seu modelo lógico, que substitui a fisiologia do cérebro cognitivo da abelha.

Um MAV com estas características respeita a anatomia e a fisiologia das abelhas e pode ser bastante eficaz quanto a capacidade de mimetismo da biologia, tornando a engenharia de MAV capaz de copiar as funções e de utilizar o veículo MAV como veículo de monitoria e espionagem.

Contribuição Biônica para a Engenharia [3]:

A engenharia como um todo, incluindo engenharia civil, mecânica, química, de produção, mecatrônica, eletrônica, materiais e aeronáutica possui muito o que aprender e estudar com os sistemas biológicos da natureza. Ouso dizer que deveria existir uma cadeira de engenharia focada exclusivamente em engenharia biônica de estudos de sistemas biológicos. O homem tem muito o que aprender com sistemas biônicos pois é através dele que milhares de plantas e animais sobrevivem e contribuem para a manutenção da flora e da fauna no planeta. Uma cadeira específica de Engenharia Biônica poderia gerar um conjunto enorme de soluções e tecnologias em todas as áreas do conhecimento humano, desta forma, há a necessidade de se estudar todas as áreas da engenharia tradicional aplicada para estudos de sistemas biológicos, plantas e animais. Uma cadeira específica de sistemas biônicos colaboraria enormemente para a construção de tecnologias em todas as áreas do conhecimento e da tecnologia construída pelo homem.

Uma hipotética cadeira de Engenharia Biônica iria criar uma série enorme de novas tecnologias, como respiratória, digestiva, cardíaca, muscular, esquelética, cerebral, nervosa, excretora, sanguínea, entre outras. A cadeira de Engenharia Biônica iria criar máquinas e dispositivos de todos os tipos, formas, conteúdos e funções.

Máquinas Biônicas iriam ser capazes de substituir órgãos doentes, capacitar órgãos com necessidades especiais, como por exemplo coração, pulmão, rins, esqueletos entre outros.

Uma hipotética cadeira de Engenharia Biônica iria ser capaz de unir a biologia, a anatomia, a fisiologia tanto dos seres humanos como também de animais e das plantas. A união das cadeiras de engenharia mecânica e eletrônica com as cadeiras de biologia, anatomia, biomedicina, entre outras, permitiram um ganho sem precedentes nas condições de órgãos, tecidos e funções biológicas.

A agronomia, a anatomia, a biomedicina, a flora, a fauna, a biologia e outras cadeiras só teriam ganhos se seus estudos e pesquisas fossem somados e agregados a cadeiras de matemática, de física e de engenharia.

O voo das abelhas poderia ser um modelo inicial de estudo para constituir as cadeiras de Engenharia Biônica. O voo das abelhas, assim como o voo de águias, e de beija-flores poderiam

iniciar a constituição destas cadeiras de Engenharia Biônica. Sabe-se que o princípio de voo das abelhas é totalmente diferente dos princípios de voo das águias e dos beija-flores.

Mas uma cadeira de Engenharia Biônica deveria ter condições de estudo das minhocas, das árvores, dos cachorros, das aves, enfim de todo um conjunto de animais e plantas que permitem produzir novas máquinas e novos sistemas que possam vir a ajudar o ser humano.

Se o ser humano estudasse e construísse máquinas que fossem capazes de voar como as abelhas, ou como os beija-flores ou mesmo como as águias, ocorreria um grande salto funcional na sua dinâmica logística de movimento.

Ao estudar a dinâmica de voo das abelhas, verificamos que o modelo de voo das abelhas é totalmente diferente dos modelos de voo de aeronaves de asa fixa, como também dos veículos de asa rotativa.

As abelhas não possuem asas fixas, mas sim asas flexíveis que realizam movimento vertical e também horizontal. O movimento vertical das asas das abelhas cria um empuxo para cima e o movimento horizontal criam um empuxo para frente.

Um hipotético modelo de engenharia baseado em MAV que imite as abelhas deveria possuir um conjunto de asas flexíveis com movimento piezo-elétrico que provocasse o arrasto para cima e para frente ou em guinada.

Um MAV piezo-elétrico criaria uma dinâmica de voo baseada em arrasto dos pares de asa e criaria movimento VTOL, movimento pairado, movimento frontal e movimento em guinada.

A utilização de tecnologia piezo-elétrica se justifica para validar o rápido movimento vertical e horizontal das asas possuindo um tempo de resposta, proporcional à mudança da dinâmica elétrica. Outras tecnologias de movimento não teriam o tempo de resposta desejado que ocorre com a tecnologia piezo-elétrica. Uma rápida mudança elétrica gera uma rápida mudança de pressão mecânica.

Assim um MAV deve possuir conjunto de pares de asa acoplados com articulações piezo-elétricas. Sendo que o primeiro par de asas deve realizar o movimento VTOL e pairado e o segundo par de asas deve realizar o movimento frontal e guinado.

Em ambos os casos de voo o MAV opera com princípios de arrasto mecânico, seja na vertical quanto na horizontal.

Se o voo das abelhas não fosse estudado, não se saberia que as asas se comportam com arrasto vertical e horizontal e não se poderia modelar um equipamento MAV que viesse a imitar este comportamento. Somente este comentário já justifica a criação de uma cadeira de Engenharia Biônica. Cadeira esta que viesse a imitar diversas funções dos animais e das plantas.

Assim fica aqui meu comentário: devemos investir nosso capital intelectual na construção de um conjunto de disciplinas de Engenharia Biônica.

Estudos e Pesquisa a Curto Prazo

3.7.1. Abordagem Interdisciplinar

É fundamental expressar que um estudo sobre conhecimento e tecnologias de sistemas bióticos precisa atuar em cadeiras multidisciplinares. Uma abordagem multidisciplinar é extremamente importante, pois há ciência desde a anatomia dos animais e plantas, até processos físico químicos complexos que mantém a fauna e a flora em harmonia com toda a natureza. Assim, ao se pensar em uma Cadeira de Engenharia Biônica, faz-se necessário estabelecer um conjunto de profissionais de diferentes áreas da ciência para estudá-los, aprendê-los e conseguir construir diferentes equipamentos tecnológicos que atuem imitando sistemas biológicos específicos. É fundamental que engenheiros trabalhem junto com biólogos, com anatomistas, com fisiologistas, com radiologistas, entre outros. E no caso específico das abelhas, devem trabalhar junto com apicultores.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Cadeiras multidisciplinares são fundamentais para a construção de um hipotético e teórico conjunto de disciplinas de Engenharia Biônica. Para se tratar de estudos e de pesquisas a curto prazo, deve-se planejar e construir estudos e pesquisas que sejam capazes de desenvolver rapidamente este escopo de estudos e de pesquisas.

Estudos e Pesquisas a curto prazo permitiriam que ocorra modelos inteligentes que imitem o conjunto de ciências biológicas que capacitem a biologia, a anatomia, a fisiologia entre outras cadeiras biônicas que possam vir a criar modelos matemáticos baseados em princípios biológicos.

A união da matemática e da engenharia com a biologia, a anatomia e a fisiologia criaria um ganho enorme e sem precedentes em relação a atual característica da ciência humana.

Unir matemática com biologia permitiria um salto enorme em relação a atual ciência humana, pois construiria e criaria um modelo sem precedentes na história da ciência.

A constituição dos modelos matemáticos unidos aos princípios biológicos iria constituir um conjunto científico sem precedentes na história da humanidade. O voo das abelhas é apenas um pequeno salto em relação a este enorme potencial de estudo e pesquisa que um hipotético conjunto de estudos que a Ciência da Engenharia Biônica pode gerar.

A Engenharia Biônica permite estudos em várias áreas do setor científico, entre eles cerebral, muscular, cardíaco, esquelético, sanguíneo, aéreo, digestivo, alimentar, aquático entre outros.

A aplicação de todas estas cadeiras científicas capacitaria o ser humano a compreender, estudar, pesquisar e desenvolver tecnologias diversas que poderiam vir a construir várias máquinas e vários equipamentos que pudessem vir a gerar ganhos em todas as áreas do conhecimento humano.

Aprender com os animais e com as plantas permitiria ao ser humano criar e construir modelos matemáticos, modelos científicos e máquinas que pudessem vir a aumentar as condições

de conhecimento das ciências e construir melhores máquinas que pudessem vir a aumentar o conforto do ser humano em todas as áreas.

Estudos e pesquisas a curto prazo podem ser feitas com grandes ganhos, uma vez que imitar a biologia através da Engenharia Biônica não se trata de uma ação difícil e sim relativamente fácil de se realizar, uma vez que imitar e copiar a natureza não é tão complexo de se realizar. Imitar e copiar é mais fácil que desenvolver do zero.

A ciência que se desenvolve do zero é bastante difícil para se construir; já copiar e imitar a natureza é bem mais fácil de se pesquisar, planejar e construir. Copiar a natureza permite desenvolver tecnologias de forma bem rápida. Desde os setores cerebral, muscular, cardíaco, esquelético, sanguíneo, aéreo, digestivo, alimentar, aquático entre outros.

O fato de pesquisa na área ser operacional a curto prazo justifica enormemente a capacidade de se implementar a Engenharia Biônica estudando os seres animais e as plantas, pois o tempo de resposta científico se justifica plenamente.

Ciência com tempo de reposta a curto prazo é fundamental para construção de novas tecnologias e novos sistemas. Sejam eles mecânicos, eletrônicos e ou biológicos.

3.7.2. Novos Algoritmos

A dinâmica de voo das abelhas possui uma lógica de operação em ciclo de batimento das asas. Quando as abelhas desejam voar pairadas, basta manter o ciclo estável vencendo a força da gravidade. Quando as abelhas desejam voar para cima ou para baixo, estas devem alterar o ciclo de batimento das asas para maior ou menor que a força da gravidade. Quando as abelhas desejam voar para frente, parte do ciclo de batimento das asas deve empurrar o ar

para trás, gerando um empuxo para frente. Se as abelhas quiserem voar para trás, parte do ciclo de batimento das asas deve empurrar o ar para frente, gerando um empuxo para trás. Quando as abelhas desejam realizar voo guinado para sentido horário, parte do ciclo de batimento das asas da esquerda deve gerar um empuxo para frente e parte do ciclo de batimento das asas da direita deve gerar um empuxo para trás; caso o voo guinado seja no sentido anti-horário, a asa da esquerda deve gerar um empuxo para trás e a asa da direita deve gerar um empuxo para frente. Este modelo pode ser imitado em Aeronaves MAV utilizando-se de algoritmo específico para controle da dinâmica de voo.

As abelhas possuem 4 asas, 1 par de asas exteriores e 1 par de asas posteriores. As asas exteriores geram o voo VTOL e o voo pairado, enquanto que as asas posteriores geram o voo frontal e o voo guinado.

As asas exteriores realizam o empuxo de cima para baixo criando a sustentação VTOL e o voo pairado, enquanto que o par de asas posteriores realizam o empuxo para frente criando o voo frontal e o voo guinado.

É interessante observar que ambos os pares de asas exteriores e posteriores podem também criar um movimento conjunto operando de forma simultânea, gerando um movimento simultâneo.

Os pares de asas, exteriores e posteriores podem realizar tanto um movimento conjunto quanto um movimento separado. E estas alterações permitem realizar voo VTOL, voo pairado, voo frontal e voo guinado, dependendo da simultaneidade de batimento das asas ou dependendo da diferença de batimento das asas.

Pensando em um algoritmo de voo das asas, pode-se observar que ocorre diferentes lógicas de voo e de batimento e estas diferenças nos algoritmos de voo realizam dinâmicas de voo alteradas, criando lógicas de voo para cima, para frente e para lado.

As diferentes lógicas de batimento das asas, provocados por diferentes algoritmos de batimento, realizam diferentes comportamentos de voo. Estes diferentes comportamentos

permitem comportamentos alterados e faz com que as abelhas tenham diferentes capacidades de voo, o mais flexível possível.

A lógica de batimento vertical criando empuxo para baixo, gera sustentação para cima; a lógica de batimento vertical para cima, com o mínimo de área em arrasto, gera sustentação para baixo; Como a área de empuxo para baixo é máxima e a área de arrasto de empuxo para cima é mínima, gera um arrasto resultante médio grande para cima; Ou seja, o voo para cima gera o arrasto é máximo e o voo para baixo o arrasto é mínimo, gerando um arrasto resultante para cima.

Do mesmo jeito o arrasto para frente é máximo, enquanto que o arrasto para trás é mínimo gerando um arrasto resultante para frente e ou em guinada.

Uma aeronave MAV que utilize os mesmos princípios de voo vertical e horizontal através de uma articulação piezo-elétrica deve ser capacitada com os mesmos recursos de voo gerando voo vertical resultante e voo frontal e guinado resultante.

Ou seja, a MAV deve ser capaz de criar voo VTOL e voo pairado usando diferencial de voo de empuxo para cima e voo frontal e voo guinado usando diferencial de voo de empuxo frontal e guinado.

Uma aeronave MAV deve possuir a capacidade de batimento de asas usando articulações de asas com capacidade de movimento vertical e horizontal.

Os algoritmos das aeronaves MAV devem ser capazes de controlar o batimento das asas criando o movimento desejado, seja ele, movimento vertical e/ou movimento horizontal. Estes algoritmos devem controlar o voo VTOL e/ou pairado e também o voo frontal e/ou guinado.

Somente um conjunto de sistemas e softwares de controle podem garantir que o comportamento de batimento das asas pode garantir a dinâmica de voo dos pares de asas.

Estes algoritmos de voo devem ser armazenados em chips de memória que devem ser

guardados no corpo da aeronave MAV, corpo este que imite o tórax e o abdómen da abelha MAV.

Este tórax e abdómen devem armazenar tanto a memória de batimento de voo quanto o processador de batimento dos pares de asas exteriores e posteriores de forma a esconder os chips de memória e de processamento nestes órgãos.

3.7.3. Módulos Eletrônicos análogos

Os Sistemas MAV podem ser construídos utilizando-se tecnologia de microeletrônica e também nanotecnologia para que sejam projetados, fabricados e testados. Entre eles módulos eletrônicos que realizem dinâmica de voo análoga ao das abelhas. Sistemas microeletrônicos e de nanotecnologia podem ser construídos para aferir a dinâmica e controle de voo expressado no item anterior. Pode-se também utilizar-se de sistemas piezo-elétricos para executar a vibração e o movimento do ciclo de batimento das asas das abelhas, uma vez que a utilização de servo-motores seria muito cara, muito grande e também pesada. A sugestão para utilizar sistemas piezo-elétricos permite a utilização de sistemas pequenos que executem a mesma dinâmica de voo das abelhas, quando comparada ao ciclo de batimento das asas.

Os sistemas piezo-elétricos das aeronaves MAV devem permitir uma articulação de batimento vertical e também uma articulação de batimento de torção. As asas MAV devem articular para posicionar a asa horizontalmente, de forma a criar arrasto para cima; e deve também articular para posicionar a asa verticalmente, de forma a criar um arrasto para baixo mínimo.

No arrasto para cima, calcula-se usando o coeficiente de arrasto da asa na vertical da área da asa, enquanto que no arrasto para baixo, calcula-se usando o coeficiente de arrasto da asa na horizontal, e a área de ataque da asa.

Assim tanto na área de arrasto horizontal quanto na área de ataque de arrasto vertical ocorre o cálculo do arrasto proporcional a densidade do ar, à velocidade de movimento da asa, a área de arrasto ou de ataque e o coeficiente de arrasto. Coeficiente este de arrasto que depende o perfil da asa.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Assim, necessita-se de circuitos eletrônicos que permitam realizar e executar o batimento e a torção das asas. Tanto o batimento quanto a torção das asas dependem de circuitos eletrônicos que executam dinâmica e controle piezo-elétrico.

Assim há a necessidade de bateria de alimentação de voltagem, circuitos de controle lógicos e circuitos de potência para dinâmica piezo-elétrica.

A composição destes circuitos eletrônicos deve permitir a dinâmica de batimento e torção desejadas, tanto das asas exteriores, quanto das asas posteriores.

Desta forma a dinâmica de voo dos MAV realiza um comportamento mimético em relação ao voo tradicional das abelhas. A dinâmica de voo com o empuxo vertical para baixo, com a asa disposta na horizontal; enquanto que o empuxo vertical para cima, com a asa disposta na vertical gera um voo VTOL ou pairado;

Da mesma forma que a dinâmica de voo com empuxo horizontal para trás gera um voo frontal ou de guinada. O voo frontal ocorre com a dinâmica simultânea do movimento das asas posteriores e o voo guinada ocorre com a dinâmica do movimento alternado das asas posteriores do MAV.

Nos veículos MAV os circuitos eletrônicos devem ser capazes de substituir as funções fisiológicas e anatômicas que são executadas pelos tecidos e órgãos das abelhas.

Assim os módulos eletrônicos dos MAV que imitem abelhas devem ser análogos aos sistemas biológicos das abelhas. Isto vale para os pares de asas, vale para as antenas, vale para os sensores ópticos, vale para os sensores olfativos e para os sensores auditivos.

Os circuitos eletrônicos devem ser capazes de realizar mimetismo desejado seja eles em

projetos MAV complexos, seja em projetos MAV simplificados.

O comportamento das aeronaves MAV deve executar funções eletrônicas com o máximo de capacidade de mimetismo das funções biológicas, fisiológicas e anatômicas das abelhas, que as aeronaves desejam imitar.

3.7.4. Representação de sinais

A representação de sinais específicos é fundamental para executar com eficácia uma missão específica de um MAV. Nas abelhas a representação de sinais está associada a localização da colmeia, à localização da florada, à presença ou não de vento, comunicação entre abelhas similares, etc. Já num MAV a representação de sinais tem que ser capaz de transportar o peso e a carga de sensores específicos para missões específicas. Estes sensores e representantes de sinais precisam ser construídos também, utilizando-se de tecnologia microeletrônica e de nanotecnologia para diminuir ao máximo o tamanho espacial e o peso das cargas transportadas.

As abelhas se comunicam geograficamente através do sinal irradiado da abelha rainha. Com este sinal as abelhas operárias e os zangões conseguem se direcionar para a colmeia devido ao sinal emitido pela abelha rainha. Este sinal é contínuo com uma frequência única e constante e com este sinal as abelhas operárias e zangões conseguem se localizar no meio geográfico de forma a localizar a colmeia. Com este sinal em frequência específica emitida pela abelha rainha capacita as abelhas a localizarem a colmeia.

As abelhas também emitem um sinal de localização espacial de forma a permitir que outras abelhas desenvolvam seu voo sem que haja colisões entre elas.

As abelhas podem usar este sinal da mesma forma que um MAV pode utilizá-lo para que estas possam realizar um voo conjunto e coletivo sem colisões. Utilizando o princípio do Efeito Doppler as abelhas e os MAV podem saber se o sinal é de aproximação ou de afastamento, ou se é mantida uma distância constante entre elas.

Assim com este modelo de Efeito Doppler com as outras abelhas e com a frequência mãe da abelha rainha, as abelhas conseguem se posicionar o espaço tanto em voo solo quanto em voo coletivo.

Desta forma estamos considerando 4 sinais, sendo 2 sinais emitidos por cada abelha em cada uma das antenas e 2 sinais emitidos pela abelha rainha. Cada par de sinais permite não somente verificar aproximação e ou afastamento, mas também localizar a região espacial de onde vem os sinais. Se fosse utilizado apenas um sinal, este não conseguiria localizar geograficamente a posição no espaço. Assim, usando um par de sinais as abelhas conseguem localizar a direção de origem do sinal.

Ou seja, 2 sinais com frequências específicas cada um emitido pelas abelhas operárias e zangões e 2 sinais com frequências específicas cada um emitido pela abelha rainha. Esta capacidade de localização da origem dos sinais é muito semelhante à capacidade humana de saber a origem de um som com 2 ouvidos.

Outro conjunto de sinais é também emitido pelas abelhas operárias, que são executados na comunicação entre elas da localização de um florada de interesse. E há também uma outra comunicação entre os zangões para comunicar a execução do voo nupcial da abelha rainha.

Já um equipamento MAV pode e deve comunicar diferentes sinais de rádio com frequências específicas que permitem fornecer informações técnicas desejadas de cada categoria de voo e tipo de informação, não somente para voo solo, mas também para voo coletivo.

Um equipamento MAV pode ser programado para uma quantidade inúmera de informações, cada informação com uma frequência desejada específica.

Para tanto o veículo MAV tem que possuir capacidade de emissão de sinais eletromagnéticos através de sinais de rádio e deve possuir processamento e memória digital para programar e controlar o conjunto de sinais cujo MAV for capaz de executar.

3.7.5. Efeitos espaço-temporais

A dinâmica de voo de um MAV é bastante curta, isto devido à necessidade de transporte de baterias pequenas que limitam voos de longa duração. Assim a missão de um MAV deve ser bastante objetiva e deve evitar longos deslocamentos no espaço e também no tempo, de forma a otimizar o limite de bateria transportada. Pequenas baterias significam pequenos deslocamentos no espaço e no tempo.

Pequenas baterias significam pequenas capacidades de voo, tanto voo vertical quanto voo horizontal. A proposta é utilizar baterias de íon de lítio, no entanto a capacidade de voo não é longa.

A capacidade de voo tanto espacial quanto temporal é de curta duração, mesmo porque as baterias precisam ser pequenas de forma a ser ocultada por uma capa que envolva a bateria de forma a ocultá-la com um hipotético exoesqueleto.

O consumo de energia é proporcional a velocidade de batimento das asas e proporcional ao envio e recebimento de sinais eletromagnéticos através de processamento de informações no processador e no banco de memória.

Deslocamento espacial e deslocamento temporal proporcional ao batimento das asas são os principais efeitos de consumo de energia das baterias.

Uma pequena bateria de íon de lítio permite criar efeito de espaço-temporal de curta duração, mas permite também, através da alteração da dinâmica das asas, realizar voo desejado.

Um veículo MAV necessita recarregar as baterias de forma a permitir que o voo possa vir a continuar a missão desejada ao qual foi programado para realizar.

A vantagem de se utilizar íon de lítio é o fato de a voltagem se manter constante mesmo que

haja consumo de carga elétrica.

Baterias de íon de lítio grandes podem consumir 8.800 mAh e pesam cerca de 45 gramas. A proposta é usar baterias de íon de lítio ainda menores.

É interessante observar que as abelhas conseguem realizar voo espaço-temporais de forma coletiva, sem que ocorra colisão entre elas. Um conjunto de veículos MAV devem também ser capaz de se deslocar no espaço de forma coletiva agindo de maneira a evitar colisões entre os equipamentos. Para que haja o controle do voo coletivo as aeronaves MAV devem usar os conceitos de voo pelo Efeito Doppler.

Efeito Doppler de aumento da frequência significa aproximação dos equipamentos; Efeito Doppler com diminuição da frequência significa afastamento dos equipamentos. Assim ao comparar o aumento ou a diminuição de frequência, permite que as abelhas e ou os MAV se afastem ou se aproximem de maneira a executar o voo coletivo com segurança.

Essas condições de voo por Efeito Doppler permitem aos veículos MAV o controle do voo em espaço-temporal de maneira segura. Este modelo de voo ocorre de maneira a realizar um efeito coletivo de conjunto dominó onde os MAV executam um movimento coletivo de afastamento de forma inteligente garantindo a segurança de voo do conjunto coletivo de aeronaves.

Este efeito espaço-temporal coletivo e dominó garante a execução de voo em segurança, e o modelo e equipamentos MAV imitam o voo biológico do enxame das abelhas, de modo a garantir a estabilidade do voo coletivo.

Para que os veículos MAV possam controlar este voo coletivo, os veículos MAV tem que possuir um sistema de memória e de processamento digital e precisam também possuir um par de antenas receptora e emissoras de sinais eletromagnéticos.

Este par de antenas devem ser capazes de realizar a comunicação não somente de aproximação, mas também de afastamento e deve ser capaz de executar a emissão de sinais

eletromagnéticos para controle do Efeito Doppler pelo sinal eletromagnético.

Além disso, o sistema deve ser capaz de receber sinais dos outros veículos MAV de maneira a perceber se o sistema está em aproximação ou se o sistema está em afastamento, de modo a controlar o comportamento de voo do MAV de forma segura.

Os sinais de aproximação e afastamento utilizam uma frequência de referência padrão, ou seja, se a frequência recebida for maior que a frequência de referência, significa que as aeronaves MAV estão se aproximando; e se a frequência recebida for menor que a frequência de referência, significa que as aeronaves MAV estão se afastando;

Com esta capacidade de leitura de sinais eletromagnéticos consegue-se executar um modelo de efeito dominó de maneira segura para as aeronaves MAV.

3.7.6. Mecanismo de Adaptação

Missões de reconhecimento de padrões específicos ou não nos dispositivos MAV exigem que este seja capaz de realizar adaptação ao ambiente. Por exemplo, caso o MAV esteja procurando uma fonte de radioatividade, o mesmo tem que ser capaz de se deslocar no espaço e localizar a fonte com a maior capacidade de adaptação possível, se realizar prejuízo para a eficácia da missão.

A capacidade de adaptação deve permitir que diferentes ambientes possam trabalhar de maneira a constituir diferentes comportamentos de voo e de fornecimento de informações.

O MAV deve ser capaz de fornecer diferentes sinais eletromagnéticos que correspondem a diferentes informações do meio ambiente onde ele se encontra, seja devido à procura de uma pessoa, à procura de um objeto, ou à procura de qualquer outro sistema.

O mecanismo de adaptação do MAV precisa ser flexível o suficiente para realizar

modificação de voo quando encontrado os sistemas que ele vem a procurar.

No caso das abelhas, estas enviam informações para a colmeia quando encontram uma florada desejada e também recebem informações a abelha rainha para se posicionar e encontrar a localização da colmeia.

Estes mecanismos de adaptação são fundamentais para a operação dos MAV, pois permite reconhecer o movimento do MAV pela base central e também permite que outros MAV possam se posicionar de acordo com cada necessidade.

Diferentes MAV podem ter diferentes comportamentos e diferentes mecanismos de adaptação permitindo que um conjunto de MAV tenham um time de comportamento coletivo.

Você pode ter um conjunto de MAV cada um com um comportamento específico de maneira que a equipe tenha um ganho coletivo de comportamento.

Por exemplo, você pode ter um MAV verificando a umidade do ar, outro verificando a temperatura do ambiente, um terceiro filmando um canto da sala, ou quarto filmando o outro canto, um quinto checando o ambiente externo e assim por diante. De forma a possuir um conjunto de informações coletiva e cada um deles executando um mecanismo de adaptação individual e coletivo.

3.7.7. Interface homem-máquina

Os sistemas MAV tem que ser capaz de realizar de forma eficiente uma comunicação completa entre o equipamento e o homem que o monitora. Esta interface homem-máquina pode ser baseada em imagens, em sensores, em dispositivos de alerta, entre outros. No entanto, independentemente de tipo de dispositivo, o MAV tem que ser capaz de informar ao homem-monitor o estado do ambiente monitorado pelo mesmo, incluindo todo e qualquer tipo de artefatos observados pela missão.

A interface homem-máquina é fundamental na eficácia da missão que o veículo MAV venha a executar e realizar. Uma central de operações deve ser capaz de receber sinais eletromagnéticos dos veículos MAV em tempo real. Estes sinais podem ser de diferentes categorias incluindo sinais de vídeo, sinais de áudio, sinais de temperatura, de pressão de umidade entre outros.

A interface homem-máquina é fundamental para enviar novas missões da central para os veículos MAV de maneira a modificar a missão e replanejar a operação em si.

A comunicação da central com os veículos MAV deve ser capaz de não somente receber informações vitais, mas também deve ser capaz de alterar a missão e propor um novo comportamento do MAV.

Para que a interface seja bem sucedida, esta deve ter um par de antenas nos veículos MAV que devem ser capaz de receber informações e também de enviar informações para outros MAV e também para a central.

Os MAV devem possuir um processador e também um banco de memória para “ler” as informações recebidas por outros MAV e pela central. A central deve ter seu par de antenas também para enviar e receber informações dos diversos MAV. Este par de antenas deve fornecer novas ordens e novas orientações de voo para diferentes missões para os diferentes MAV.

Este conjunto de antenas, processador e memória é o mecanismo mínimo necessário para que a interface homem-máquina possa realizar missões solicitadas e necessárias. Em relação à central, esta deve possuir um sistema de vídeo que deve ser capaz de receber informações de imagem e de som dos olhos e das antenas dos veículos MAV.

É interessante que a central consiga “ler” as informações enviadas pelos veículos MAV simultaneamente aos diversos veículos em paralelo, e consiga enviar novas missões para cada MAV específico, ou seja, deve ser capaz de enviar missões específicas para MAV específicos e não para todos igualmente.

3.7.8. Sensoriamento e Motor

As abelhas utilizam-se de suas antenas para localizar floradas e o caminho de volta para colmeia. Utilizam-se do batimento de suas asas para executar a dinâmica motora para cima, para baixo, para frente ou para trás, e guinada horária e anti-horária. A combinação de antena e asa permite que as mesmas realizem sua missão de colher pólen e levá-lo para a colmeia de forma efetiva. Já os MAV possuem diferentes missões, o que significa que seu sistema de sensoriamento precisa ser específico para localizar e realizar uma missão também específica. Quanto ao modelo motor, quando falamos de equipamentos maiores, pode-se usar motores elétricos, no entanto, quando falamos de equipamentos menores temos que adotar a vibração de sistemas piezo-elétricos para gerar a propulsão baseada em batimento das asas.

O princípio de sensoriamento dos MAV deve possuir sensores de imagem, sensores de áudio, sensores de temperatura, sensores de pressão, sensores de umidade, sensores de olfato, não todos ao mesmo tempo, mas cada um para sua missão específica.

Os MAV devem possuir sensores específicos para diminuir o peso e o volume da carga necessária para voo. Assim, cada MAV deve carregar os sensores necessários para realizar a missão necessária.

A capacidade de voo deve ser baseada em movimento de conjunto de corpo-asa baseada em dinâmica piezo-elétrica assim operando de forma bem mais leve do que se utilizasse sistemas de motores elétricos.

Assim, com poucos sensores (somente os necessários) e com atuadores piezo-elétricos os veículos MAV possuiriam um pequeno peso, quando comparado com uma hipotética máquina com vários sensores e vários motores.

Poucos e pequenos sensores e atuadores piezo-elétricos significam peso baixo e volume

pequeno o que é fundamental para performance de voo dos sistemas MAV.

É fundamental que os veículos MAV sejam pequenos, por isso os sensores devem ser específicos para cada missão. Não se deve possuir MAV com várias missões diferentes, pois estes necessitariam de um conjunto de sensores diferentes, mas sim, deve realizar MAV pequenos com poucos sensores e com sensores específicos, isto para que os MAV sejam pequenos e leves. Quanto mais específica for a missão, menor a necessidade de diferentes sensores e com isto mais leves e menores seriam cada um dos veículos MAV específicos.

3.7.9. Sistema de visão computacional baseado em modelos animais

O sistema de visão nas abelhas é utilizado para localizar floradas específicas, localizar outras abelhas da mesma colmeia e encontrar a localização da colmeia. Pode-se imitar este comportamento, utilizando-se de tecnologia de redes neurais para localização de padrões de reconhecimento. Em aeronaves MAV pode-se dizer que redes neurais podem ser utilizadas para localizar armas, artefatos bélicos, drogas, entre outros. Nos animais há uma conexão neural entre o olho e a rede de neurônios do cérebro. Esta rede de neurônios é capaz de localizar e reconhecer uma imagem específica e sugerir uma ação motora específica.

O princípio de redes neurais é fundamental para a localização e reconhecimento de padrões. As redes neurais não precisam estar operando nos MAV, porque exige uma grande capacidade de processamento de dados, mas podem operar na central, de forma que os MAV enviam as informações “lidas” para a central e estas realizam o processamento das informações de maneira a reconhecer os padrões. Os padrões uma vez identificados podem informar os MAV novamente com uma nova missão ou ordem.

Assim, processamento de redes neurais e reconhecimento de padrões devem ser executados na central e não nos veículos MAV. Deve-se lembrar que os veículos MAV possuem uma capacidade de execução de dados em memória pequenos e não seriam capazes de realizar grandes processamentos de redes neurais.

Nos animais, mais especificamente nas abelhas, o processamento de reconhecimento de padrões ocorre no cérebro das mesmas; já no caso dos MAV não se recomenda que isso ocorra nos veículos, mas sim na central, pelos motivos já explicados anteriormente.

Assim, os MAV devem ser capazes de “ler” as geometrias e as cores e enviar os sinais que correspondem a estas leituras para a central. E a central realiza o reconhecimento dos padrões e envia novas missões para os veículos MAV.

Nos modelos da natureza, nos animais, incluindo nas abelhas, realizam-se o processamento neural e reconhecimento de padrões nos cérebros das mesmas, no entanto na tecnologia MAV isto não é aconselhável. O sistema de reconhecimento baseado em redes neurais deve ser realizado na central.

3.7.10. Controle Distribuído

A concentração centralizada de controle de um sistema não é aconselhada, pois esta permite ser danificada ou fragilizada diante, por exemplo, de um ataque de um animal maior, o que faria com que o controle fosse danificado e a dinâmica de voo se tornasse inviável. Assim em sistemas MAV que imitam a natureza, é interessante distribuir o controle fabricado sob sistemas micro-eletrônico e sob nanotecnologia de maneira a tê-los replicados e distribuídos em 2, 3 ou 4 locais.

No entanto, as aeronaves MAV são muito sensíveis e frágeis, portanto é interessante concentrar e distribuir o controle inteligente em mais de um computador central. A opção de distribuir os controles em diversos MAV pode ser inicialmente interessante, pois diminuiria o risco de uma danificação, contudo como a capacidade de memória e processamento nos MAV é pequena, torna-se mais interessante distribuir o controle inteligente em vários controles centrais e distribuídos.

Assim, processamentos e memórias pequenos podem ser instalados nos MAV, contudo sistemas complexos de grande memória e pesado processamento não deve ser instalado nos MAV e sim nas estações centrais. É interessante também que as centrais de processamento, possuam

backup on-line em cluster de maneira a proteger eventuais danos.

Assim, processamentos de baixa memória e baixo processamento podem ocorrer dentro dos MAV, de forma que decisões simples possam ser tomadas pelas próprias abelhas, já processamentos complexos e pesados devem ser processados nas centrais de operação.

Por exemplo, identificação de modelos específicos podem ser captados via sinais 1 e 0 nos olhos dos MAV, contudo a interpretação deste conjunto de 1 e 0 devem utilizar princípios de processamento e memória de redes neurais e devem ser processados nas centrais.

O controle distribuído permite a otimização de processamento e de memória de maneira inteligente, hábil, rápida e segura. Principalmente mais rápida e mais segura.

Controles e processamentos considerados pequenos de baixo processamento e baixa memória podem ser realizados nos processamentos microeletrônicos e de nanotecnologia nas próprias aeronaves MAV.

Processamentos pesados de alta necessidade de memória são inviáveis de serem realizados nos MAV e devem ser operados nas centrais de operação.

Com esta distribuição opera-se de forma otimizada todo o processamento tanto pesado quanto simples e permitem executar os diversos processamentos de maneira ágil, rápida, inteligente e segura, como já mencionado anteriormente.

Assim, constrói-se uma arquitetura multi-processamento e multi-memória potencializando a operação lógica e a arquitetura digital distribuída e paralela.

A arquitetura multi-processamento, multi-memória, digital, paralela e distribuída defende-se a tese de que se trata de uma arquitetura otimizada para executar toda e qualquer operação que otimize a mimetização da operação da natureza, sendo o nosso caso em particular, das abelhas.

O controle distribuído é bastante interessante, pois garante a segurança contra um ataque. Assim, vale a pena pensar em ter um controle de pequeno porte nas aeronaves MAV e um controle maior de grande porte em duas ou três centrais de processamento de inteligência.

Desta forma tem-se um controle micro-eletrônico com nanotecnologia distribuído nas aeronaves e centralizado com replicação em 2 ou 3 sistemas para garantir segurança do sistema de processamento de grande porte.

O controle distribuído permite maior segurança e replicação das aeronaves. De forma que o dano em uma aeronave não gera dano nas outras, pois elas operam de forma independente.

Além disso, as aeronaves não somente operam com Engenharia de Controle distribuído, mas também operam com Engenharia de Controle Coletivo e simultâneo gerando voo coletivo de forma segura sem colisão e sem acidente. O Controle Coletivo desta forma evita choques e colisões entre as aeronaves.

Para permitir a não colisão e os não choques entre as aeronaves estas se comunicam através das antenas com sinais eletromagnéticos usando o princípio do Efeito Doppler. Quanto mais agudo for o sinal do Efeito Doppler, mais próximos estão caminhando as aeronaves; e quanto mais grave for o sinal do Efeito Doppler, mais distante estão caminhando as aeronaves. Ou seja, se o sinal está agudo representa aproximação das aeronaves; se o sinal está grave representa afastamento das aeronaves.

O Controle Distribuído permite tomada de decisão simultânea e em paralelo. Otimizando a relação entre as diversas aeronaves.

As abelhas realizam esta operação através do sinal eletromagnético emitido e recebido pelas antenas. Ao monitorar os sinais eletromagnéticos, as abelhas validam se ocorre aproximação ou se ocorre afastamento das outras abelhas.

O Controle Distribuído também opera em conjunto com o Controle Centralizado da Central de Operação, aumentando ainda mais a precisão e a segurança.

Desta forma o controle distribuído junto com o controle centralizado gera um processo altamente seguro e altamente preciso.

3.7.11. Novas formas de processamento de informação

A comunicação entre as abelhas ocorre através das antenas pela vibração de diferentes frequências. Este processamento identifica uma determinada vibração como sendo representadora de determinada informação. Este modelo também pode ser aplicado em aeronaves MAV, onde a comunicação pode ocorrer entre a base terrena e a aeronave, de forma a modificar uma atuação, alterar uma missão, solicitar o retorno à base (“à colmeia virtual”), entre outros, através da modificação de uma frequência específica.

A comunicação ocorre com diferentes frequências, onde cada frequência específica representa uma informação diferente e assim, com diferentes frequências operam diferentes informações com significados em missões diferentes.

Ou seja, frequência eletromagnética enviada pelo par de antenas A significa informação A, enquanto que outra frequência eletromagnética B significa informação B. Com diferentes frequências recebidas, as abelhas realizam diferentes ações.

Ou seja, as abelhas podem receber informações diferentes a grandes distâncias pois o fundamental para reconhecer uma missão é a interpretação da frequência em si. Independentemente da distância em que se posicionam as abelhas, o sinal eletromagnético permite ser lido, uma vez que se trata de um sinal eletromagnético.

Este modelo de sinalização eletromagnético pode também ser replicado nas

aeronaves MAV, uma vez que se podem comunicar e tomar diferentes decisões através de diferentes sinais eletromagnético, recebido a curta, média e longa distância.

Usando este padrão de comunicação pode-se utilizar diferentes formas de processamento de informação, uma vez que o comando de comunicação e o padrão de significados é representado por diferentes sinais de diferentes frequências eletromagnéticas.

Assim, um modelo de comunicação baseado em frequência eletromagnética tanto para emissão das antenas, quanto para recepção das antenas se torna bastante eficiente para definir novas missões de voo. Este modelo pode ser copiado das abelhas e aplicados nos MAV.

O processamento e a memória das aeronaves MAV devem ser capazes e suficientes para conseguir ler e identificar qual é a frequência que está sendo recebida. Podem ocorrer duas ou mais frequências recebidas simultaneamente, e os recursos digitais tem que ser capaz de identificá-los simultaneamente.

Caso o volume de diferentes frequências seja pequeno, o sistema digital pode reconhecê-lo imediatamente através de circuitos digitais específicos de reconhecimento.

Ou seja, se estivermos falando de 4, 5 ou 6 diferentes frequências e diferentes sinais as aeronaves MAV podem transportar circuitos digitais de percepção de frequências específicas e não necessitam processamento das frequências em memória.

Ou seja, você pode construir um circuito digital que reconhece frequências específicas de operação de maneira a não necessitar de processamento nem de memória digital.

Estudos e Pesquisa a Longo Prazo:

3.8.1. Projeto para recepção de moléculas

Com o desenvolvimento de técnicas de nanotecnologia, as aeronaves MAV poderão ser capazes de identificar e receptor moléculas específicas. Estas moléculas podem ser relacionadas com diferentes contextos, entre eles, radioatividade, arma química e outros. Estudos capazes de permitirem que as aeronaves MAV executem ações que hoje não podem ser executadas são fundamentais para justificar diferentes áreas de pesquisa que sem os veículos MAV não seria possível.

A nanotecnologia deve com o tempo ser capaz de equipar os MAV com recursos específicos para operação bioquímica. Pequenas moléculas poderão ser utilizadas em missões específicas, entre elas localização de radioatividade, localização e atuação de armas químicas, e em diversas outras aplicações onde pequenos tamanhos e pequenas dimensões podem se tornar fundamentais.

Com a atuação da nanotecnologia, os MAV ganham intensamente em potencial e capacidade de operação. A carga para recepção de moléculas se torna um diferencial sem igual.

Projetos com estes objetivos são fundamentais para criar um diferencial único e fantástico, sem iguais. A capacitação de aeronaves com capacidade de carregar e portar moléculas gera um processo diferenciado.

A localização de armas químicas, a localização de pontos de radiatividades e tudo isso de forma escondida, velada e secreta, uma vez que os MAV não seriam localizados, permite que os projetos e desenvolvimento dos MAV sejam intensificados.

Por este motivo o estudo dos voos das abelhas deve ser intensificado, pois estas colhem néctar que pode ser imitado para que os MAV colhessem moléculas. Naturalmente o néctar é milhões de vezes maior que pequenas moléculas de aeronaves com capacidade de carga de

nanotecnologia; contudo o algoritmo de recolhimento pode ser bastante similar ao modelo MAV em relação ao modelo biológico das abelhas.

Mais uma vez, permite-se capacitar tecnologias humanas com o comportamento biológico, bioquímico e biofísico.

Evidentemente que estudar, pesquisar, desenvolver e construir aeronaves de comportamento MAV não ocorre a curto prazo, e sim deve-se desenvolver pesquisa a longo prazo para viabilizar esta operação.

Este casamento entre tecnologia MAV e nanotecnologia opera e deve ser capaz de ser desenvolvida num horizonte de tempo ainda não definido, contudo ocorrerá sem sombra de dúvida.

3.8.2. Física da Interface biológica

Do mesmo jeito que aeronaves MAV podem e devem ser capazes de realizar missões hoje impossíveis, com um sistema físico de interface biológica, as aeronaves MAV poderão realizar missões de comunicação com outros sistemas biológicos. Por exemplo, pode-se construir um MAV para se comunicar com a abelha rainha; pode-se construir um MAV para comunicação com zangões, etc.

E outras interfaces de relacionamento com os biomas. Um MAV pode se relacionar com outros MAV e também com outros sistemas biológicos. Um MAV pode pousar numa colmeia e se relacionar através de sinais eletromagnéticos com outras abelhas, com outros zangões e também, por que não com a abelha rainha.

Este modelo de relacionamento dos MAV com as abelhas, pode também ser executado com outros animais.

Um MAV pode aprender a “ler e ouvir” diferentes sinais eletromagnéticos e sônicos que as abelhas executam, de forma a poder decifrar o dialeto e as “palavras” em frequência que as abelhas, os zangões e a abelha rainha emitem.

Este aprendizado do modelo de comunicação das abelhas pode ser replicado também para outros animais.

Esse tipo de ciência pode ser usado para se descobrir frequências eletromagnéticas e sônicas para aumentar a produtividade da colmeia. Fazendo com que estes sinais estimulem as abelhas da colmeia e desenvolvam o melhor comportamento possível com máximo de rendimento na produção do mel.

Para isso, basta que sejam reconhecidas as frequências de alto estímulo das abelhas da colmeia e manter um MAV dentro ou próximo da colmeia de maneira a criar este estímulo eletromagnético, que venha a provocar as abelhas para trabalharem com o alto grau de produtividade.

Desenvolver esta interface física-biológica com sistemas computacionais e digitais permite a criação de dezenas e ou centenas de tecnologias que venham a criar um novo universo de sistemas para a comunicação com animais. Isto pode ser feito com golfinhos, com elefantes, com leões, etc. e evidentemente com as abelhas.

3.8.3. Bioacelerômetro

O sistema de aceleração das abelhas é baseado no aumento do empuxo horizontal, ou seja, como o empuxo horizontal é constituído de parte do ciclo de batimento das asas, empurrando-as para frente, ao aumentar a parte do ciclo de batimento das asas para frente, faz com que a força de empuxo médio aumente e desta forma as abelhas realizam o voo frontal de forma acelerada. Quanto maior o tempo de empuxo para frente diante de um ciclo de batimento completo, maior será sua aceleração frontal.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

As abelhas possuem 2 pares de asas, um chamado par de asas exteriores, e outro chamado par de asas posteriores. As asas exteriores são usadas para a execução do voo VTOL e do voo pairado; já as asas posteriores são usadas para a execução do voo frontal e do voo em guinada.

É interessante saber que as abelhas medem em torno de 2 cm e trabalham com batimento de asa em frequência de 190 Hz e pesam entre 16 e 23 gramas. A abelha rainha mede em comprimento 2 ou 3 vezes isto.

Ou seja, o batimento das asas posteriores nesta frequência de 190 Hz, gera um empuxo para frente proporcional ao arrasto das asas para trás. É interessante notar que quando a asa empurra o ar para trás ela cria um empuxo proporcional à área da asa, no entanto quanto a asa avança para frente o par de asa posterior torce-se mecanicamente para exercer um arrasto mínimo, pois o arrasto se torna proporcional à face da asa, que é muito pequena e muito menor que a área da asa.

Assim, o empuxo das asas posteriores para trás opera como um bioacelerômetro, onde a aceleração é proporcional à força de arrasto para trás e inversamente proporcional à massa da abelha. O impulso que gera a diferença de momento horizontal é proporcional ao intervalo de tempo de 0,005 segundos (190 Hz).

Desta forma, a diferença de velocidade dinâmica opera em relação às abelhas é previsto como segue abaixo:

$$F \cdot dt / m = \Delta V, \text{ onde:}$$

F = força de arrasto

dt = intervalo de dinâmica da asa da abelha (190 Hz)

m = massa da abelha

DeltaV = variação de velocidade provocada pelo impulso com duração dt

3.8.4. Novos algoritmos

O ciclo de batimento das asas é controlado através de uma lógica biônica, onde se aumenta ou diminui o empuxo horizontal; aumenta ou diminui o arrasto vertical; aumenta ou diminui o empuxo de guinada horário ou anti-horário. Esta lógica permite que as abelhas controlem, aumentem e diminuam sua dinâmica de voo desejada. Modelos semelhantes podem ser aplicados em aeronaves MAV, uma vez que se trata de um modelo bastante eficaz e relativamente simples.

Desta forma o batimento das asas, tanto asas exteriores quanto asas posteriores operam segundo um ciclo específico. Ciclo este que começa com um batimento para baixo, gerando um empuxo para cima e segue com um batimento para cima com a asa em face gerando um diferencial maior para baixo do que para cima. Este diferencial gera um empuxo resultante que empurra a abelha para cima ou para um voo VTOL ou mesmo pairado.

Da mesma forma um batimento de asas posteriores para trás gera um empuxo para frente ou em guinada. O ciclo de batimento empurra o ar para trás e avança de volta em face, de maneira a ter um empuxo resultante para frente ou em guinada.

Este modelo pode ser implementado em aeronaves MAV utilizando o princípio de piezo-eletricidade para criar o empuxo diferencial seja para cima, quanto para frente. A proposta de usar piezo-eletricidade é devido ao baixo peso e às baixas dimensões da piezo-eletricidade em comparação com outros tipos de motores.

A piezo-eletricidade gera um batimento para baixo e para cima e gera uma torção horária e anti-horária, de modo que ocorra um batimento diferencial para baixo, gerando um empuxo para cima, e da mesma forma gerando um batimento diferencial para trás, gerando um empuxo para frente.

Este modelo de voo pode ser facilmente implementado em aeronaves MAV utilizando a torção e o batimento como modelos de empuxo vertical e horizontal.

Ou seja, utilizando-se de um algoritmo simples, pode-se implementar o voo da abelha similar ao voo de uma aeronave MAV, através da mimetização deste modelo.

É importante lembrar que o batimento das asas das abelhas opera com uma frequência média de 190 Hz, e para um mesmo peso de cerca de 16 a 23 gramas, a proposta seria utilizar a mesma frequência de operação para os MAV, ou seja 190 Hz, cujo empuxo é demonstrado no tópico anterior.

Desta maneira o empuxo é proporcional a massa e a velocidade de voo desejado e inversamente proporcional ao intervalo de tempo do ciclo de frequência (intervalo de tempo do batimento: 190 Hz).

De forma que o algoritmo de batimento e torção das asas é bem simples de ser implementado.

3.8.5. Sistemas de Mensuração e Controle

O sistema de voo dos MAV, quando estes imitam a dinâmica das abelhas, necessitam ser capaz de medir o arrasto de cada asa em cada momento do ciclo de batimento dinâmico; deve ser capaz de aumentar ou diminuir de forma progressiva a frequência do ciclo, pois quanto maior a frequência, maior será o valor do arrasto seja na vertical, no frontal ou em guinada; e deve ser capaz de medir a resposta da velocidade de voo em qualquer direção.

Assim, o circuito piezo-elétrico dos MAV com batimento e frequência de oscilação deve permitir a mensuração da dinâmica de controle das asas. Quanto maior for a dinâmica e a frequência de batimento, maior será o empuxo resultante e conseqüentemente maior será a velocidade de resposta.

É importante para as aeronaves MAV que consigam medir a velocidade de batimento, pois quanto maior for a velocidade, maior será a frequência e menor será o intervalo de tempo do batimento das asas.

Desta maneira é possível medir a força de arrasto e também a velocidade de empuxo. Medir e controlar a velocidade de empuxo é fundamental para realizar o controle da dinâmica de voo dos MAV.

Como a força de empuxo é representada pela equação a seguir:

$$F = \frac{1}{2} \rho (w R_h)^2 C_l + \frac{1}{2} \rho (w/R)^2 S - \frac{1}{2} \rho (w/R)^2 S C_d,$$

onde:

F = força de arrasto

rho = densidade do ar

w = velocidade angular do ciclo de batimento das asas da abelha (190 Hz)

wh = velocidade angular do ciclo de batimento das asas posteriores

R = raio das asas das abelhas

Rh = raio das asas posteriores das abelhas

S = área das asas das abelhas

Sh = área das asa posteriores das abelhas

Cd = coeficiente de arrasto

Cl = coeficiente de sustentação das asas posteriores

Quanto maior for a frequência de batimento, maior será a força de arrasto e quanto maior for a força de arrasto, maior será a velocidade diferencial de empuxo.

Ou seja, medir e controlar o arrasto, representa medir e controlar a velocidade de voo, tanto VTOL e pairado, quanto em guinada ou a frente.

3.8.6. Integração e Amplificação Biológicas

As abelhas vivem integradas a diferentes classes de sistemas biológicos, diferentes floras e diferentes faunas. As abelhas são capazes de se adaptar a estes diferentes tipos de sistemas biológicos. Os MAV devem igualmente ser capazes de sobrevoar uma determinada área ou setor geográfico de forma a não ser prejudicada sua missão. Sistemas MAV precisam ser capazes de voar em condições críticas e mesmo assim atingir com eficácia a meta para o qual foi designado.

Desta forma, da mesma maneira que as abelhas se adaptam a diferentes ambientes de fauna e flora, as aeronaves MAV também devem ser capazes de se adaptar a diferentes ambientes e diferentes missões. Sejam elas, tóxicas, radioativas, sônicas, visuais, eletromagnéticas entre outras.

A integração com a biologia do ambiente deve ser capaz de operar com diferentes sistemas e diferentes tempo-espaço de maneira a ter condições de executar a missão independentemente de restrições no local da operação.

Determinados ambientes podem ser muito hostis, contudo o MAV assim como as abelhas, devem ser capazes de executar a missão para qual foi designado de forma satisfatória.

O MAV deve ser capaz de medir a toxicidade do ambiente, a radiatividade do ambiente, a química de armas exposta no ambiente. Enfim, o MAV tem que ter condição de se sobrepujar a todo e qualquer tipo de ação do espaço-tempo em que ele operar na missão mandada, sem interferência externa.

A ação de predadores também deve ser percebida e interferida. Você pode ter animais de grande porte, por exemplo ursos, que atuam em busca de mel na colmeia. Este tipo de predador pode vir a exigir que as abelhas operárias, os zangões e a abelha rainha, saiam do espaço local onde a colmeia está disposta e construir uma nova colmeia em outro ambiente.

Da mesma forma, as aeronaves MAV podem ser atacadas por predadores e elas devem ser capazes de prever este tipo de ataque e se defender de forma planejada e adequada.

Ação de predadores na fauna biológica é muito comum, e como os MAV são muito pequenos, eles podem ser alvos de todo e qualquer tipo de predador de maior porte. Quanto maior for a capacidade de atingir altas velocidades a partir da velocidade de voo pairado, maior será a chance da aeronave MAV escapar e fugir de predadores.

A integração biológica com o meio ambiente de fauna e flora é premissa básica para a atuação dos MAV de forma segura, eficaz e eficiente.

A atuação de vários MAV simultâneos em forma de enxame permite que eventuais predadores se assistem e se afastem de forma a proteger as pequenas aeronaves.

A atuação de voo coletivo em conjunto não é simples e deve ser estudada em projetos de controle de voo específicos, fazendo parte de uma pesquisa futura e profunda. Este voo coletivo pode ser a diferença entre uma missão mal sucedida e uma missão bem sucedida.

Além disso o voo coletivo permite a repartição e distribuição de diferentes funções entre as diferentes aeronaves MAV. Você pode ter um conjunto de aeronaves MAV com função A e outras aeronaves MAV com função B e ou C, e assim por diante. A distribuição de funções pode ser bastante eficaz na execução e segurança de execução das mesmas.

Um hipotético enxame de aeronaves MAV pode ser a diferença entre uma missão ou com um conjunto de missões com ou sem sucesso e eficácia.

3.8.7. Representação de sinais

Os MAV devem ser capazes de transportar diferentes tipos de sensores e captadores de sinais, entre eles, deve ser capaz de transportar sensores construídos com técnicas de nanotecnologia e microeletrônica. Estes sinais devem ser informados para uma base de lançamento em tempo real, de forma a permitir que a base defina uma segunda ordem, ou uma nova missão ou mesmo um retorno imediato a base.

Os sinais eletromagnéticos devem ser capazes de informar a base sobre supostas informações que as aeronaves MAV venham a pesquisar e/ou procurar e encontrar. Dependendo da função das aeronaves MAV, esta deve ser capaz de informar através de sinais eletromagnéticos algo, ou alguma coisa, que a aeronaves esteja procurando.

Os sinais emitidos pela base para as aeronaves devem capacitar as aeronaves para modificar a missão e orientar para uma nova operação aérea.

Assim, tanto os sinais emitidos das aeronaves MAV para a base, tanto quanto os sinais emitidos da base para as aeronaves têm que ser capazes de alterar a missão e orientar para uma nova atitude de voo mecânico, e de orientação e função eletrônica.

A comunicação entre a base e as aeronaves MAV devem ser executadas por elas, utilizando-se de sinais eletromagnéticos emitidos e recebidos pelas antenas com diferentes frequências.

Cada diferente frequência é representativa de diferentes funções e diferentes ordens e consequentemente de diferentes atitudes a ações.

Em relação as abelhas, as operárias informam o enxame quando localiza uma florada de interesse através de um sinal eletromagnético emitido pelas antenas; e elas também observam sinais recebidos da abelha rainha para localizar onde se posiciona a colmeia. Se a abelha rainha não emitisse este sinal de localização da colmeia, as abelhas operárias não conseguiriam localizar a posição geográfica da colmeia.

Da mesma forma, quando a abelha rainha sai para seu voo nupcial, as abelhas zangões emitem sinal para outros zangões para informar qual a localização da abelha rainha em voo nupcial.

Desta forma com diferentes frequências emitidas e recebidas pelas antenas permitem que as abelhas executem diferentes atitudes e ações.

Com este conceito os MAV podem desenvolver atitudes e ações diferentes cada um deles com funções mecânicas, anatômicas e fisiológicas diferentes em relação às abelhas e mecânicas e eletrônicas em relação às aeronaves MAV.

O princípio parece simples e realmente o é. Diferentes sinais para diferentes funções. Sejam os sinais emitidos pelas antenas dos MAV e recebidos pelas outras MAV e ou pela base, como sinais emitidos pela base e recebidos pelas MAV. Assim, tanto as MAV como a base devem ter condições tecnológicas para “leitura” eletromagnética de diferentes frequências dos sinais eletromagnéticos recebidos.

Diferentes frequências representam diferentes sinais e diferentes ordens e atitudes a serem realizadas, tanto pelas abelhas, quanto pelos zangões, quanto pelas aeronaves MAV.

3.8.8. Sistema de tolerância a falhas

Os MAV são sujeitos a diferentes danos, entre eles: calor, frio, vento, umidade, fogo, radiação, arma química, eletromagnetismo entre outros. Estes devem ser capazes de suportar todos estes tipos de ataques ambientes de forma a resistir ou mesmo de substituir um primeiro sistema para um segundo sistema back-up. A tolerância a falhas deve ser construída com a replicação de um primeiro conjunto de operadores por um segundo ou mesmo terceiro sistema de operadores, tentando assim, minimizar o risco de falhas não suportadas.

Como as peças e os componentes dos MAV são extremamente pequenos, ter um conjunto de sistemas backup na mesma aeronave pode não ser viável. Assim a alternativa é posicionar segunda

aeronave MAV próxima da primeira para que esta aeronave backup possa substituir rapidamente a aeronave MAV anterior.

Assim, a segunda aeronaves MAV pode manter a comunicação com a base ativa de maneira a poder ser programada ou reprogramada para executar a missão a contento. A base deve informar rapidamente a segunda aeronaves de maneira a não perder informações necessárias e fundamentais para a execução da missão com sucesso.

A comunicação entre a MAV danificada e a base, e entre a base e a MAV backup deve ocorrer de imediato para que a MAV backup possa não perder informações importantes ao processo e à missão da primeira MAV.

Todos estes danos, entre eles: calor, frio, vento, umidade, fogo, radiação, arma química, eletromagnetismo entre outros devem ser corrigidos rapidamente para a aeronave MAV backup. Quanto mais rápido for a transferência de informações da base para o MAV backup, maior será a probabilidade de sucesso na substituição das aeronaves.

Neste caso, velocidade de transmissão de dados se torna fundamental para a missão de substituição das aeronaves de maneira bem sucedida.

Este modelo se caracteriza por um bom sistema de tolerância a falhas. Se ao invés de ter um MAV backup, se tivesse segundo ou terceiro sistema de backup dentro da própria MAV, esta seria muito pesada e exigiria grandes volumes.

Assim a opção de ter uma aeronave MAV backup é mais interessante, mais eficaz, mais leve e com menor volume do que ter 2 ou 3 sistemas backups instalados na própria aeronave.

Este modelo de tolerância a falha com a substituição de um MAV principal por um MAV reserva é um modelo bastante satisfatório e permite que não se perca qualquer tipo de informação entre a aeronave e a base. Mesmo porque a base faz a leitura constantemente e continuamente, sem

restrição. E pode rapidamente reprogramar a MAV reserva para uma nova missão planejada.

A comunicação entre a MAV principal, a base e a MAV backup deve ocorrer de forma praticamente on-line e em tempo real.

Desta forma a MAV backup terá condições totais de substituir a MAV principal a contento. Deve-se lembrar que a MAV reserva é um espelho pleno e perfeito em relação a arquitetura de hardware e software quando comparada a MAV principal.

Trata-se de duas aeronaves perfeitamente iguais em termos dos equipamentos e do potencial funcional para execução de missões.

3.8.9. Visão Computacional (continuação)

O Sistema de Visão Computacional dos MAV deve evoluir para permitir que através de algoritmos de redes neurais estes possam reconhecer rapidamente todo e qualquer tipo de objeto procurado. A combinação de células foto sensíveis com o modelo matemático de redes neurais deve ser capaz de permitir o reconhecimento de diferentes padrões de objetos procurados ou não.

As redes neurais devem ser instaladas na base e deve ser capaz de identificar diferentes objetos, diferentes geometrias, diferentes floradas.

As redes neurais devem ser instaladas na base uma vez que a capacidade de programação exige grande memória e processamento. As capacidades de programação não devem ser instaladas nas MAV, pois exige uma necessidade de programação e memória muito grande.

Nas aeronaves MAV devem ficar somente os sensores ópticos que devem ler os sinais de visão de imagem e devem enviar estes sinais de visão computacional para a base e nesta devem ocorrer todo o processamento de memória e processamento das redes neurais.

Assim, os sensores ficam nas aeronaves MAV e o processamento fica na base. Com este tipo

de arquitetura computacional, torna-se eficaz e eficiente o processamento e a memória de maneira a otimizar o modelo de redes neurais.

Com este modelo de visão computacional se permite executar de forma bastante eficaz a percepção e o reconhecimento de geometrias e cores, sendo capaz de identificar diferentes floradas, que produzem diferentes qualidades de mel; isto para as abelhas e para os MAV permite localizar diferentes geometrias, diferentes objetos, diferentes materiais, e diferentes armas químicas e ou radioativas.

Com esta capacidade de identificação de objetos, os MAV conseguem tornar-se um sistema de reconhecimento absolutamente diferenciado. De maneira a ocupar um espaço físico e de observação totalmente e absolutamente especial. Já que consegue encontrar um variado tipo de objetos observados e diferidos.

A capacidade de visão computacional que os MAV podem desenvolver através de reconhecimentos de padrões em redes neurais torna estes equipamentos num modelo e num algoritmo uma ferramenta totalmente eficiente e eficaz.

Desta forma os MAV realizam a leitura óptica e envia as informações lidas para a base, esta realiza o reconhecimento de padrões através da identificação por redes neurais. Uma vez reconhecidos os padrões, a base envia uma nova missão para as aeronaves de maneira a reprogramar sua atitude de voo e de missão.

Assim as aeronaves MAV e a base operam conjuntamente de maneira síncrona, eficaz e rápida, gerando modificações na operação de acordo com o objeto localizado e identificado.

Objetos diferentes geram e exigem missões e comportamentos diferentes.

3.8.10. Transmissão de informação e telemetria

Sistemas de telemetria e transmissão de informação devem ser capazes de atuar em tempo real de forma a transferir a informação para uma base de lançamento e permitir que esta base tome novas decisões de forma a redirecionar a aeronave MAV para uma nova missão, seja ela a localização de um novo alvo ou mesmo um retorno de volta a base.

Desta forma as tecnologias de telemetria entre a aeronaves MAV e a base de operações se torna fundamental, pois somente com a comunicação entre os dois cabe alteração e modificação de missão para o MAV e tomada de decisão pela base.

A principal sugestão de telemetria opera com funções de frequências distintas. Ou seja, cada frequência emitida pela base ou emitida pela MAV cabe e representa funções de operação diferente. Para cada frequência uma função de mobilidade distinta.

Trata-se, portanto, de uma comunicação de rádio frequência específica para cada função específica.

Ou seja, cada MAV tem que transportar uma pequena estação de rádio tanto para emissão, quanto para recepção. E a base deve suportar n estações de rádio, pois deve operar de forma paralela e simultânea em tempo real com n diferentes MAV.

A transmissão de informação através de telemetria eletromagnética em sinal de frequência deve ser capaz de atuar simultaneamente com todos os MAV que operam junto a uma base principal.

Ou seja, o sistema deve ter estação de rádio para recepção e transmissão em cada MAV e deve ter diversas estações de rádio para recepção e transmissão na base, cada uma delas para as diversas e distintas aeronaves MAV.

A operação da telemetria deve trabalhar com diferentes frequências, cada uma delas para as aeronaves MAV específicas e com comandos e formato de informações de frequência que significam e representam dados e informações diferentes.

O Modelo de Telemetria de Informações operado através de sinal eletromagnético de rádio demonstra uma grande eficácia, pois com diferentes frequências é possível saber qual a aeronave MAV que está transmitindo a informação e também enviar a informação para a aeronave MAV correta. Além disso, com diferentes frequências casadas com diferentes MAV, pode-se perceber a recepção do sinal de rádio da aeronave correta e ou emitir informações para a base, e esta pode transmitir novos comandos e novas missões para a aeronaves desejada e intencionada.

Para capacitar as aeronaves MAV estas devem possuir um conjunto de estação de rádio, processador digital e banco de memória, todos com dimensões mínimas para não ocorre sobre carga e sobre peso e sobre volume pelas aeronaves que devem ter tamanhos o quanto menor melhor.

Por isso, é mais interessante transmitir informações da MAV para a base e desta base para outra MAV do que transmitir de uma MAV para a outra, uma vez que a base não tem restrições de peso, dimensão e/ou volume.

Ou seja, ao invés de enviar uma mensagem de uma aeronave para outra, a primeira aeronave deve enviar a mensagem para a base e esta deve entrar em contato telemétrico com a outra aeronave e emitir a mensagem para ela.

Desta forma, as aeronaves podem ser menores e a base pode ter dimensões maiores uma vez que esta não necessita pequenos pesos, nem pequenos volumes.

3.8.11 Processamento Paralelo com neurônios artificiais sofisticados

A utilização de neurônios artificiais através de processamento paralelo pode permitir um grande potencial de desenvolvimento e implementação de reconhecimento de padrões. Reconhecimento este que permitiria que diferentes missões venham a ter sucesso em diferentes ambientes hostis. Com o processamento paralelo de neurônios artificiais ocorreria a aceleração do tempo de resposta de padrões a serem reconhecidos.

O princípio de redes neurais pode ser implementado para reconhecimento de diferentes padrões geométricos. Assim, como as abelhas conseguem reconhecer diferentes floradas, os MAV podem reconhecer diferentes geometrias, de forma a localizar objetos procurados e interessados.

Com técnicas de redes neurais, os MAV conseguem se posicionar de forma adequada de maneira a localizar objetos distintos, geometrias distintas e formas desejadas. Entretanto, não é interessante que o processamento de redes neurais fique instalado nos MAV, mas sim, devem ser instalados na base de forma a permitir processamento paralelo das redes neurais com outros processamentos simultâneos.

O processamento paralelo com neurônios artificiais utilizando-se dos modelos de redes neurais, permite a otimização do processo, de forma que os MAV se posicionem exclusivamente com a “leitura” dos sinais externos. Ou seja, o MAV recebe os sinais e envia para a base de maneira que esta realiza o processamento e o reconhecimento de padrões.

Ou seja, o processamento paralelo de reconhecimento de voo através de neurônios artificiais permite a otimização do processo com algoritmos simultâneos de captação de informações, envio destas informações para a base e a base realiza o reconhecimento do padrão.

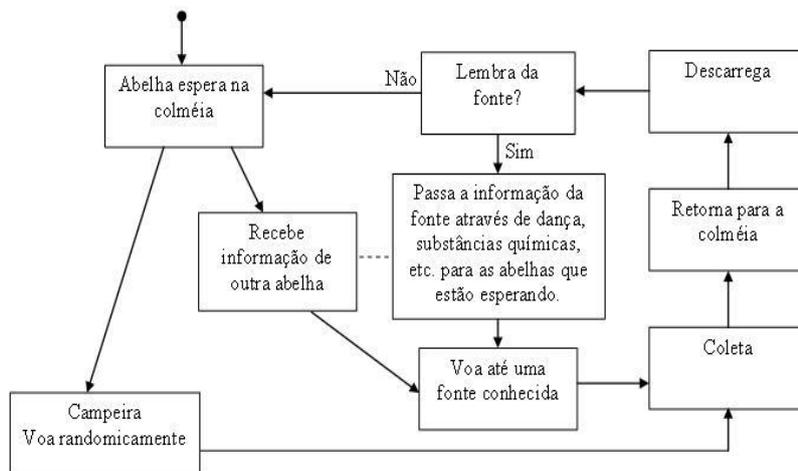
Se pensarmos a respeito das abelhas, estas por serem independentes e únicas e múltiplas ao mesmo tempo, estas também realizam processamento em paralelo e independentes.

Ao se desenvolver movimentos diversos e executar leituras de sinais geométricos, transmitir estes sinais para a base e realizar a checagem de diferentes padrões e reconhecimento de padrões, este permite que ao operar em paralelo, que estas informações sejam processadas de forma otimizada.

O processamento em paralelo se torna absolutamente fundamental. Não se pode pensar em outra forma de processamento, pois qualquer outra forma iria se tornar ineficiente e ineficaz.

As informações entre as abelhas não ocorrem somente através de envio de mensagem eletromagnética, mas também através da repartição de substâncias químicas entre as abelhas que estão localizadas, esperando na colmeia e também através de movimento mecânicos “em dança”.

Pode-se verificar a seguir o fluxograma de compartilhamento de informações na colmeia. O comportamento dinâmico funcional, biológico e vital para a execução e realização do voo das abelhas está registrada no gráfico a seguir:



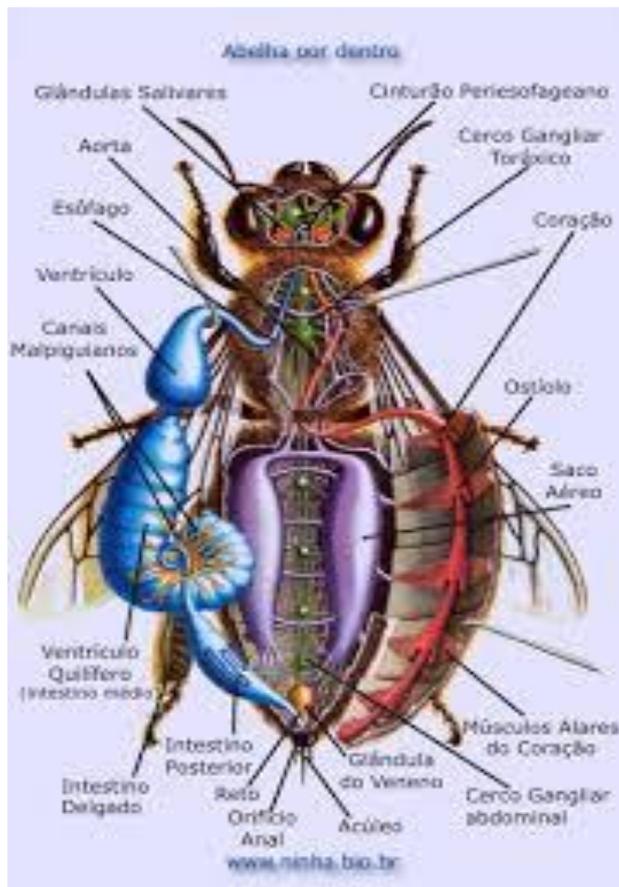


Figura 3: Partes anatômicas Internas das abelhas

4. OBJETIVO

O objetivo deste estudo para aplicar na Dissertação de Mestrado no ITA é compreender a dinâmica de voo dos Sistemas Biológicos das Abelhas, através de seus estudos de estrutura biológica, incluindo esqueletos, exoesqueletos, tecidos, geometria das asas, dinâmica das asas, sistemas aerodinâmicos, com finalidade de repensar os modelos matemáticos que definem as equações de voo dos sistemas de asa fixa civil, asa fixa militar e asa rotativa para aumentar a dinâmica de comportamento destes sistemas, incluindo: voo pairado; decolagem e pouso VTOL; intensas acelerações e desacelerações; execuções rápidas de curvatura; e rápidas subidas e descidas.

Ao se estudar o modelo de dinâmica de voo das abelhas, percebe-se que há um grande campo de pesquisa e desenvolvimento que permitem repensar as técnicas de voo dos equipamentos feitos pelo homem. Estudar o modelo das abelhas significa ponderar que existe na natureza: formas e funções que podem ser exercidas de maneira inusitada e melhor que nos tradicionais veículos aéreos de asa fixa o/ou de asa rotativa concebidos pelo homem.

O objetivo desta tese não é somente estudar as asas das abelhas, mas também o seu sistema e dinâmica de voo. Isto significa que a meta desta tese é compreender profundamente o modelo matemático de aerodinâmica, de fluxo de ar, de batimento de asa, de rotação e torção de asa, de decolagem VTOL, de voo pairado, de pouso VTOL, de voo em guinada, de voo a frente, de voo para trás; e procurar capacitar outros pesquisadores e estudiosos a capacitar veículos MAV para realizar tais dinâmicas de forma semelhante física, mecânica e aerodinâmica de voo.

O foco desta tese se posiciona em compreender o modelo matemático do voo das abelhas e permitir que outros pesquisadores venham a implementá-lo em aeronaves MAV. Cada elemento do conjunto de funções descritas na introdução desta tese representa um componente matemático por vir a ser implementado e não deve ser esquecido o potencial de operação que surge e ocorre quando se constitui uma equipe de trabalho multidisciplinar.

Assim, como todo sistema biomimético (aquele que imita a biologia), o voo das abelhas deve ser estudado e compreendido, de maneira a entender o voo isolado e também compreender o

voo coletivo do enxame.

Para se compreender o voo isolado basta entender o batimento e a torção das asas. Já para compreender o voo coletivo deve-se desenvolver todo um cabedal de funções matemáticas de comunicação entre as partes, ou seja, entre as diversas diferentes abelhas.

O voo coletivo das abelhas pode e deve ser estudado para aplicação quando ocorrerá um volume enorme de aeronaves VTOL distribuídas por uma dispersão espacial pequena. Ou seja, pequeno espaço e grandes volumes de aeronaves, todas com a mesma capacidade de voo flexível dos helicópteros.

Assim o objetivo deste documento é compreender o Modelo Matemático do voo isolado de uma abelha e o voo coletivo de um enxame, para permitir aplicação deste Modelo em aeronaves MAV individuais e também em aeronaves MAV e/ou de grande porte para voo coletivo em segurança.

A aplicação de diversos modelos matemáticos pode ser implementada e enriquecidos para diferentes tecnologias de diversas áreas, da mecânica de voo ao princípio de comunicação entre as MAV e o processamento na base.

Este modelo permite o processamento de novos sensores, de redes neurais, de telemetria, de processamento de rádio, de processamento de informações em paralelo, de voo VTOL, de voo pairado, de voo a frente e voo guinado, de comunicação bioquímica, comunicação mecânica, comunicação eletromagnética e sônica, reprocessamento e mudança de missão, enfim, diversas tecnologias que podem e devem ser desenvolvidas para aplicação em enxames de MAV.

O Modelo MAV / Enxame deverá ser capaz de implementar enxames de aeronaves com capacidade de voo VTOL e pairado. Ou seja, uma infinidade de aeronaves todas voando

simultaneamente para frente para trás para o lado, voo VTOL e pairado, com poucas distâncias entre as diversas aeronaves com toda a segurança necessária ao voo coletivo de n aeronaves.

O maior desafio é exatamente constituir todo este conjunto de tecnologias que exigem e permitem a aplicação e enxames de MAV, coordenado por uma base que gerencia todo este Modelo Coletivo de Voo – Enxame.

E este grande desafio se enquadra como o principal objetivo para outras teses que venham consolidar e realizar esta dinâmica coletiva de voo. Voo coletivo este que deve permitir voo dinâmico e coletivo de transporte de seres humanos com total segurança necessária para esta qualidade de voo VTOL, pairado, a frente, guinado e coletivo.

A somatória de todas estas tecnologias descritas neste documento é totalmente necessária para viabilizar o voo coletivo de aeronaves extremamente próximas umas das outras, com total segurança que o modelo exige.

O voo coletivo exige que se trabalhe de forma contínua a ação do Efeito Doppler com atuação esférica em todas as direções. Para sinais de Efeito Doppler mais agudo que um sinal de frequência de referência, significa que as aeronaves MAV estão se aproximando; para sinais de Efeito Doppler mais grave que um sinal de frequência de referência significa que as aeronaves MAV estão se afastando.

Com este mapeamento de frequências mais agudas e mais graves que um sinal de frequência de referência, pode-se executar corretamente a missão de voo coletivo em segurança. Pois você pode ter um vetor resultante de aproximação e afastamento que permite a aeronave MAV se deslocar em sentidos opostos aos da aproximação de voo de aeronaves MAV em paralelo.

Este tipo de aplicação usando-se o Efeito Doppler como recurso se torna fundamental para voo coletivo em segurança, quando existem muitas máquinas voadoras competindo pelo mesmo espaço físico.



Figura 4: Abelha voando

5. PRODUTO ESPERADO

O produto esperado desta Dissertação de Mestrado constitui o conjunto de equações matemáticas que modelam a Dinâmica de Voo do Sistema Biológico das Abelhas e comparado com equipamentos humanos em relação à capacidade das manobras de voo. Entre as equações matemáticas que modelam o voo dos MAV e das abelhas, descrevem-se também todos os recursos funcionais e tecnológicos necessários para a correta execução dos voos.

Sensores Miniaturizados [2]

Para realizar a construção de MAV (Veículos Micro-Aéreos) compatíveis com as abelhas, tanto em tamanho, quanto em peso e também em relação à dinâmica de voo, há a necessidade de se construir e instalar sensores miniaturizados, pois somente estes podem ser capazes de transportar sem ônus de peso, carga e tamanho e também fornecer as informações necessárias para medir as diversas variáveis de controle desejadas e necessárias. Para este modelo acaba-se por ser necessário toda a tecnologia de fabricação de microeletrônica e também de nano tecnologia.

Entre os sensores miniaturizados encontram-se o par de antenas (para enviar e receber sinais eletromagnéticos), os três oscielos na frente da testa e o par de olhos (para execução de visão e reconhecimento de imagens). Estes três sistemas podem ser replicados para os MAV como um par de antenas eletromagnética, um par de antenas acústica (para sinais sonoros), um par de sensores ópticos para reconhecimento de imagem.

Deve-se ter em mente que os sensores ópticos, eletromagnéticos e acústicos operam em paralelo com a dinâmica de voo e com o processamento digital de redes neurais da base, sede do processamento e da inteligência da operação e da missão de cada MAV.

Há também nos MAV a possibilidade de se instalar sensores bioquímicos e sensores radioativos para localização de eventuais missões específicas de localização de operação de grande risco.

Em alguns casos específicos pode-se instalar nos MAV outros sensores com capacidade de localização de eventuais sinais desejados em missões pré-planejadas.

Em missões pre-planejadas de localização de sinais específicos há a necessidade de se instalar micro-sistemas e micro-sensores, estes ambos que possam a vir a executar operações desejadas e necessariamente objetivas. Deve-se ser instalado tanto os sensores de hardware e também os recursos de software que possa vir a controlar os sistemas instalados.

É importante instalar o hardware de sensores em missões específicas pois estes ocupam peso e volume que são considerados um problema para veículos MAV. Assim, somente se instala

sensores e hardwares nos MAV que são absolutamente necessários para a execução de missão desejada e mandatória.

Desta forma os MAV operam como um sistema de máquina de estado com aplicações específicas desejadas e necessárias.

Não se deve ter um MAV multi-função, pois este exige maiores capacidade de carga de peso e de carga de volume, que são indesejados em missões secretas, onde o MAV se esconde como se fosse uma abelha ou uma máquina-inseto.

Quanto menor for o hardware e os sensores, melhor poderá o MAV esconder e disfarçar sua verdadeira missão. Para um MAV multi-função esconder seus sensores se torna uma tarefa difícil.

Assim, MAV com hardware específico pode ser menor e mais leve tendo melhor capacidade de executar a missão pre-planejada sem a percepção de terceiros.

As abelhas também possuem sensores miniaturizados entre eles: o par de antenas (para enviar e receber sinais eletromagnéticos), os três oscielos na frente da testa e o par de olhos (para execução de visão e reconhecimento de imagens). No caso das abelhas a capacidade de reconhecimento de padrões é responsabilidade da própria abelha e diferentemente do caso dos MAV, cuja responsabilidade de reconhecimento por redes neurais fica na base.

As abelhas possuem uma capacidade de reconhecimento de padrões, no caso, de floradas com sua própria condição de percepção executada pelo sistema óptico de visão e pelos neurônios que ela possui.

Assim, sensores miniaturizados e específicos para reconhecimento de padrões desejados devem ser instalados nos MAV para cada tipo diferente de missão de reconhecimento em cada caso pré-planejado.

E não se deve construir MAV multi-funções, a não ser que peso e volume não sejam critérios necessários para a execução da missão. Contudo, na maioria das aplicações dos MAV tanto peso quanto volume são princípios fundamentais.

Os sensores miniaturizados, de cada MAV, devem ser capazes de monitorar em tempo real os sinais eletromagnéticos de frequência de referência gerada para controlar o Efeito Doppler de aproximação e/ou de afastamento de outras aeronaves MAV.

Este controle de aproximação e afastamento é fundamental para a execução de voo coletivo em segurança para todas as aeronaves MAV que estejam competindo pelo mesmo espaço físico.

2.1.1. Equipamentos Autônomos

Para se implementar um ou mais MAV que imitem o comportamento das abelhas, é necessário que estes MAV operem de forma independente e autônoma. Não se pode pensar em um Sistema Biomimético em imitação das abelhas, se não se pensar, planejar, projetar, construir e testar veículos autônomos que se comportem como as mesmas. Há a necessidade de se implementar tais veículos de forma totalmente independente de controles externos, pois somente uma aeronave MAV pode ser implementada de forma completa para qualquer tipo de missão se ela for autônoma e independente.

Assim, um MAV que venha a imitar o comportamento de voo de uma abelha, deve possuir a capacidade de executar o voo de forma independente. E para isso deve ser capaz de receber uma missão da base e a partir do recebimento da missão, possa vir a tomar decisões e executar padrões de voo de forma independente e autônoma.

A capacidade de escolha da forma de voo deve ser consequência de uma missão enviada da base e desta forma, deve poder tomar decisão de voo frontal, vertical, VTOL, pairado e ou guinado. Este modelo de voo deve ser consequência da decisão da aeronave MAV após

Por exemplo, caso a base envia uma missão do tipo: localizar ponto de radiação bioquímica.

A MAV deve ser capaz de tomar decisões de voo de busca e rastreamento em procura e navegação em busca da localização da fonte de radiação.

Desta maneira, a MAV deve escolher o modelo de rastreamento em busca de um ponto de radiação a ser localizado. Todo o modelo de voo deve ser capaz de escolher o mapeamento de busca para que se possa atingir a missão orientada. Ou seja, a missão enviada pela base diz o que deve ser trabalhado em voo, mas não diz como. Quem decide como será o voo é o próprio algoritmo de voo do MAV de forma independente e autônoma.

Quando uma base envia a mesma missão para várias diferentes MAV, estas devem ser capazes de escolher e tomar decisões independentes, já que cada MAV passa a possuir operações de softwares diferentes, já que cada MAV tem um conjunto de sensores miniaturizados com valores de variáveis distintas.

Desta forma, MAV distintos, apesar de poder terem o mesmo algoritmo de software, devido a diferença de posicionamento geográfico possuem valores de variáveis de sensores diferente, e portanto, precisam tomar decisões diferentes, mesmo que tenham a mesma missão e o mesmo algoritmo de voo.

Este modelo permite que usando a mesma missão e o mesmo algoritmo de voo, passam a exercer voos autônomos e distintos de uma MAV para outra, pois os valores das variáveis de sensores miniaturizados oferecem intensidades distintas e desta forma cada MAV precisa e deve tomar decisões e executar padrões de voos distintos, e individuais, autônomos e independentes de um MAV para outro.

Quando um MAV consegue realizar a missão proposta, este deve comunicar a base, para que ela re programe a missão dos outros MAV do mesmo enxame, pois a missão já foi executada pelo primeiro MAV bem sucedido e os outros MAV podem receber uma nova missão e executar um novo planejamento de voo.

Quando se tem um enxame de MAV realizando a mesma missão, quando um MAV consegue executar a missão com satisfação este deve informar a base para que ela proponha uma nova missão para todo o enxame.

2.1.2. Robôs

Os MAV devem ser capazes de se comportar como um Robô voador com capacidade de medição e controle independente de atuação externa. Os MAV precisam executar missões específicas de forma independente de atuação do ser humano, pois ele deve ser capaz de tomar decisões mecânicas de movimento e de estratégias de voo sem a intromissão dos seres humanos. Um MAV precisa decidir de sobe, se desce, se avança, se recua, se curva à direita, se curva à esquerda, se volta “à colmeia” ou outra decisão específica que ele tenha que tomar diante de uma missão também específica.

Assim, os MAV devem operar de maneira independente, semelhante a robôs e veículos autônomos, e tomar decisões e executar decisões tomadas para atingir a meta de realizar a missão com sucesso.

Um robô autônomo não pode ficar dependendo de controles externos durante toda a sua operação, mas sim, deve ser capaz de poder escolher o que deve fazer e como deve fazer. A missão deve ser informada no início da operação, mas não deve ficar intrometendo nas operações em si, pois esta deve ser executada e otimizada pelo próprio robô MAV.

Assim, a missão deve informar a meta final da operação, mas a decisão de como realizar esta meta, deve ser realizada de forma autônoma pelo robô MAV, pois somente este tem as informações de sensores miniaturizados e por conseguinte executar a missão de forma ótima.

Quanto maior for a interferência da base na operação do MAV, maior será o custo operacional no tráfego de informações e mais lenta será a tomada de decisão para execução pela MAV.

Se a MAV for independente da base, ela poderá executar a missão de forma mais rápida e mais eficaz. Se ela for dependente da base para toda e qualquer operação, a base terá de ter um processamento paralelo para todas as MAV com performance questionável, pois quanto mais MAV mais pesado será o processamento digital de tomada de decisão.

Desta forma, a arquitetura digital que sugerimos é um processamento coletivo da estratégia de missões na base e um processamento distribuído paralelo nas aeronaves MAV.

Onde a base desenvolve a estratégia das missões, e as aeronaves MAV desenvolvem a operação de cada missão.

Ou seja, uma arquitetura digital com uma base centralizada, e veículos MAV robôs distribuídos. Quanto mais independentes forem os robôs MAV, mais eficiente será a execução da missão cuja base orientou para ser executada.

Além disso, a interface dos MAV com o ser humano que opera a missão deve ser executada através da base. Ou seja, a base opera no meio, entre os robôs e os seres humanos pilotos.

Esta função da base de intermediar os robôs MAV e o ser humano que opera as missões é mais uma função tecnológica que a base opera para orientar todos os robôs da Arquitetura digital distribuída.

Com esta Arquitetura Digital Distribuída, o Sistema Completo que envolve todos os MAV, a base centralizada e o Operador Humano fornece o comportamento lógico e logístico de maneira bastante eficaz e eficiente.

Quanto mais independentes forem os componentes da arquitetura do sistema, melhor será a operação em relação a autonomia de voo e autonomia de missão. E a operação será otimizada do que se fosse controlada o tempo todo pela base e pelo Operador.

2.1.3. Conversão Foto Artificial

Os componentes de visão em veículos MAV que imitem o comportamento das abelhas necessita de uma capacidade de percepção, análise e tomada de decisão utilizando-se de sistemas de visão artificial. O sistema que imita os modelos de visão das abelhas é necessário para no mundo biológico detectar movimento de outras abelhas, outros insetos, presença de florada, presença de flores específicas, enxergar a colmeia, ou seja, processos fotodinâmicos, pois todo o sistema de voo se torna dependente dos recursos visuais necessários e abrangente. Já um MAV que imite as abelhas deve ser capaz de perceber a presença de objetos perigosos, tais como por exemplo, armamentos, drogas, radiação entre outras.

A capacidade de visualização de imagens e objetos necessários e procurados deve ser percebida pelo sistema de captação de imagens de vídeo. Estas imagens capturadas são transformadas num modelo digital de uns e zeros e este modelo digital é fornecido para a Base onde esta última realiza algoritmos de redes neurais para reconhecimento de padrões.

Estes padrões reconhecidos e identificados podem ser enviados pela Base como uma nova missão das MAV. Assim, os Modelos de Visualização dos MAV, diferentemente do Modelo das Abelhas em que estas próprias reconhecem os padrões identificados e informa as outras abelhas, no caso dos MAV, este somente realiza o recebimento das imagens, e quem executa o processo de reconhecimento é a Base.

Após a Base realizar o reconhecimento dos padrões desejados, esta pode vir a reprogramar a missão de cada MAV operado pela Base.

Assim, o Modelo de Visualização MAV e o Modelo de Visualização das abelhas são diferentes no tocante ao processo completo do reconhecimento de imagens e geometrias, floradas e colmeias no caso das abelhas e armas químicas, fonte de radiatividade, radiação e outros tipos de armas no caso dos MAV.

Enquanto que no caso das abelhas estas possuem autonomia no reconhecimento de padrões por si só, os MAV dependem da execução de algoritmos de processamento de redes neurais que são executados na Base.

Se o algoritmo fosse implementado na própria MAV, esta necessitaria uma maior capacidade de processamento e memória, o que viria a inviabilizar pré-requisitos como tamanho, peso e volume das MAV.

Para evitar este problema de tamanho, peso e volume faz-se os processamentos digitais pesados na própria Base, pois esta não tem requisitos de tamanho, peso nem volume.

Assim, esta arquitetura de processamento na Base centralizado e processamento nos MAV distribuído permite executar de forma otimizada processamentos leves e específicos nos MAV e processamento pesados e complexos na Base.

Como os processamentos dos MAV precisam ser específicos e simples, faz-se com que os Modelos MAV tenham processamento e memória simplificado e mais leves.

Já os processamentos da Base por esta controlar e orientar missões de vários MAV em paralelo acabam necessitando uma maior capacidade de processamento, memória e disco.

Assim os MAV devem operar como uma Máquina de Estado com operação específica e leve em termos de complexidade de algoritmos, enquanto que a Base trabalha a estratégia de missão de todos os MAV que ela orienta em paralelo, exigindo um poder de processamento e memória muito maior.

Engenharia de Sistemas Naturais [3]:

A natureza é um ambiente de enorme variedade de sistemas, desde sistemas marítimos, terrenos, aéreos, variada fauna e flora; ou seja, existe um enorme conjunto de plantas, animais e insetos que povoam o ambiente terreno de forma a criar um conjunto extremo de variações de geometrias, formas e movimentos que nos faz pensar se não seria fundamental existir um curso de Engenharia específico para Sistemas Naturais que estudem e imitem a natureza.

Nossa sugestão é a de criar um treinamento em Engenharia de Sistemas Naturais, onde se é estudado anatomia, fisiologia, alimentação, funções biológicas entre outras funções. A hipotética função de Engenharia de Sistemas Naturais deveria ser focada reconstrução de Modelos de Engenharia tais quais estruturas ósseas, funções bioquímicas, modelos de visão e olfato, funções motoras de locomoção tanto em terra quanto em água, funções alimentares e digestivas, modelos de caça, entre outras...

Uma cadeira de Engenharia de Sistemas Naturais seria capaz de criar uma grande revolução nas diversas cadeiras de tecnologia e engenharia. As funções fisiológicas, anatômicas e biológicas têm o potencial de rever toda uma cadeira de engenharia tradicional.

As cadeiras de engenharias tradicionais têm muito a ganhar com uma nova e hipotética cadeira de Engenharia de Ciência Naturais.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

No caso particular das abelhas o grande estudo está fundamentado no que tange ao voo solo das abelhas e ao voo coletivo do enxame das abelhas, cujos sistemas de voo são particularmente estudados neste documento.

Trata-se de um estudo particular para voo VTOL, voo pairado, voo guinado, voo a frente, etc. Este modelo de voo poderia, por exemplo, ser parte de uma cadeira de Engenharia de Sistemas Naturais de voo de insetos.

É interessante perceber que o modelo de voo dos insetos é completamente diferente do voo dos aviões, dos helicópteros e das aves, tanto de grande porte como as águias, quanto de pequeno porte como os beija-flores.

Uma hipotética estrutura educacional e de pesquisa de Engenharia de Sistemas Naturais seria capaz de criar uma infinidade de tecnologias e máquinas baseadas nesta hipotética estrutura educacional de Sistemas Naturais.

A Natureza tem o potencial de multiplicar de forma intensa a quantidade de técnicas e tecnologias no que tange a algoritmos, estruturas, funções, fisiologias, anatomias, órgãos, tecidos, lógicas biológicas, alimentação, energia, dinâmica de movimento, modelos de caça, entre outros.

Sugiro que seja desenvolvida este Modelo de Engenharia de Sistemas Naturais pois somente uma cadeira específica como esta pode alavancar de forma intensa o conjunto de estudos de funções biológicas da natureza. Quanto mais se estuda a natureza, mais pode-se em potencial desenvolver tecnologias novas e baseadas em sistemas biológicos.

A Natureza é rica em ciência, rica em metodologia, rica em funções diversas e assim como toda esta riqueza, torna-se capaz de se desenvolver modelos em diversas cadeiras de engenharia.

Quanto mais ciências da natureza vierem a ser estudadas, mais tecnologias baseada nesta hipotética ciência seria capaz de ser desenvolvidas. O voo das abelhas é apenas uma pequena parte deste conjunto enorme de estudos e pesquisas que podem vir a serem estudadas e desenvolvidas.

Esta cadeira de Sistemas Naturais deveria ter um corpo de docentes multidisciplinar, incluindo a união de profissionais especializado em modelos matemáticos e profissionais especializados em modelos biológicos.

Uma possível cadeira de forte empenho seria unir medicina e engenharia para a construção de máquinas capazes de criar a diferença entre a vida e a morte de um paciente.

Esta é a minha aposta para o futuro da engenharia e da biologia: Montar Equipes Multidisciplinares em Engenharia de Sistemas da Natureza para desenvolvimento de novas tecnologias bio-técnicas.

3.2 Sistemas Sensoriais

Os Sistemas Sensoriais das abelhas podem ser divididos em percepção visual, comunicação vibracional entre as abelhas de uma mesma colmeia, percepção da presença de pólen nas floradas, localização geográfica da colmeia, percepção do favo de mel nas células hexagonais da colmeia, percepção de vento, de chuva, de sol, percepção de calor e frio, sistemas sensoriais que guiam e orientam o voo das mesmas.

Desta forma as abelhas conseguem se localizar no espaço e se posicionar próximo da colmeia, sem se perder geograficamente. A abelha rainha emite durante todo o tempo um sinal eletromagnético e através da recepção deste sinal, as abelhas operárias e os zangões conseguem se localizar no espaço e podem voltar para a colmeia.

Cada abelha rainha possui um sinal específico, pois se assim não fosse outras abelhas rainhas iriam criar um outro sinal e faria com que as abelhas operárias se posicionassem de forma errada indo para a colmeia errada.

Duas abelhas rainhas com o mesmo sinal eletromagnético faria com que as abelhas operárias fossem e voassem para a colmeia errada.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Por este motivo, cada abelha rainha emite um sinal eletromagnético para as abelhas operárias e para os zangões de forma a emitir um sinal único e não confundisse abelhas para e de outras colmeias.

Desta forma, cada abelha rainha possui e emite um sinal eletromagnético único que faz com que as abelhas desta colmeia possam se localizar geograficamente e espacialmente.

Se a abelha rainha não emitisse este sinal eletromagnético único, as abelhas operárias e os zangões não conseguiriam se localizar no espaço nem voltar para a colmeia, pois se assim fosse elas se perderiam no espaço físico.

Este modelo de sistemas sensorial pode também ser adaptado para os MAV. Estes podem receber sinal de localização eletromagnético da Base e através deste sinal e juntamente com o Efeito Doppler emitido da Base, os MAV conseguem se localizar geograficamente e se posicionar no espaço de maneira a se aproximar ou se afastar da Base.

Este modelo de emissão eletromagnético deve também ser executado pelos outros MAV para evitar colisão entre as aeronaves. Quando um sinal eletromagnético se torna mais agudo que o sinal de referência, significa que os MAV estão se aproximando um do outro. Se o sinal é mais grave que o sinal de referência, significa que os MAV estão se afastando um do outro.

Este controle de sinais mais graves e mais agudos permitem controlar a segurança para evitar colisões entre as aeronaves MAV.

E também pode ser utilizado para se aproximar ou se afastar da Base. A Base, neste caso, faz o papel da colmeia, onde ao invés de a abelha rainha emitir o sinal eletromagnético que localização, quem realiza a emissão deste sinal é a própria Base.

Outros sistemas sensoriais podem ser instalados nos MAV com intuito de medir e reconhecer objetos específicos, como por exemplo fontes de radiação, bombas, outros veículos, etc.

É importante que os MAV operem com missões específicas e sensores específicos, pois se ele tivesse um volume grande de diferentes sensores, aumentaria enormemente o peso e o volume das aeronaves MAV.

E as aeronaves MAV devem ser pequenas e leves o mais possível, pois somente com estas características geométricas e de peso, pode-se fazer com que elas sejam confundidas com insetos, no nosso caso com abelhas.

3.2.1 Processos Neurais

Todos estes sistemas sensoriais são coordenados e monitorados por processos neurais, uma vez que há a necessidade de equilibrar todos os sentidos de forma que a abelha possa tomar a decisão de voo ou não voo de acordo com o que ela sente e percebe. A tomada de decisão passa pelo conjunto de sistemas sensoriais e encaminha para os processos neurais que em conjunto decidem ou não determinada tomada de decisão, principalmente em relação às características de dinâmica e controle de voo.

Nas abelhas, os processos neurais de inteligência e tomada de decisão ocorre no sistema nervoso e no cérebro das próprias abelhas. Isto ocorre dentro do cérebro das abelhas e não depende nem de outras abelhas nem da abelha rainha. Cada abelha tem seu próprio princípio nervoso e sua rede de neurônios que permite a localização da florada, a radio informação das abelhas para outras abelhas pertencentes a colmeia.

E também a informação da localização da florada para a abelha rainha. Desta forma as abelhas da colmeia ficam cientes de onde está localizada a florada e estas podem migrar para a localização espacial e geográfica da florada em si e podem migrar para ajudar na colheita do pólen.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Assim, os processos neurais ocorrem de forma isolada dentro do cérebro de cada abelha operária e também ocorre de forma coletiva compartilhada entre as diversas abelhas operárias do enxame da colmeia.

Assim, pode-se utilizar da arquitetura digital distribuída, pois cada abelha operária possui um sistema nervoso pontual e cada colmeia possui um conjunto de sistemas nervosos distribuídos por todo o enxame.

Os MAV podem se aproveitar desta arquitetura digital distribuída para atuar pontualmente em cada MAV e também coletivamente para todo o enxame de MAV. Com esta arquitetura digital distribuída, pode-se aproveitar desse modelo para construir softwares também com arquiteturas distribuídos que venham a se aproveitar deste modelo de maneira a otimizar o ambiente digital

Você pode permitir que uma função A específica esteja sendo realizada e processada na MAV A enquanto que uma segunda função B específica está sendo realizada e processada na MAV B, e assim por diante e por todos os conjuntos de MAV do enxame.

Portanto, diversos processos neurais podem vir a serem planejados, executados e compactados em cada uma das diversas aeronaves MAV e permite a otimização de processamento de redes neurais, ou de outro tipo de algoritmo necessário ou desejado.

O modelo do enxame das abelhas é perfeito, pois demonstra claramente que uma abelha pode executar uma função A enquanto que uma outra abelha pode executar uma função B e assim por diante.

De forma a ter uma função coletiva do enxame que permite a execução simultânea de funções A, B, C, etc.

Processos Neurais simultâneos em diversas MAV tem condição de serem executados de forma simultânea, otimizada e em paralelo.

Somente um sistema com arquitetura paralela e digital tem condições de exercer processamento em paralelo, simultâneo, otimizada e rápida.

Se o processamento fosse centralizado, isto jamais poderia ser aproveitado. Assim, deve-se aproveitar o fato de que cada abelha possui uma inteligência e uma atitude particular de comportamento para a execução de uma missão em si.

Graças a distribuição de processamento neural das abelhas, pode-se implementar algo semelhante em relação ao processamento neural dos MAV; e assim aproveitar a inteligência distribuída da arquitetura das abelhas para aplicação em uma arquitetura distribuída dos MAV.

3.2.2. Redes Neurais

As Redes Neurais são um conjunto de técnicas matemáticas capazes de serem utilizadas para reconhecimento de padrões. Isto significa que as redes neurais podem ser utilizadas através de sistemas de visão artificial em um modelo de reconhecimento de florada, de colmeia, de outras abelhas da mesma colmeia, de abelhas de outras colmeias; ao se combinar o modelo matemático de redes neurais que de certa forma imitam o modelo de neurônios cerebrais para reconhecimento de padrões, pode-se usar as redes neurais em MAV para percepção de objetos e ou padrões de reconhecimento desejado em uma missão específica, incluindo armas, pessoas, objetos de busca e procura desejados.

As redes neurais são um conjunto de uns e zeros e também um conjunto de valores de pesos que somados geram um conjunto de probabilidades que fazem o reconhecimento de variáveis conhecidas e identificadas.

Assim, quando se deseja reconhecer determinado objeto, faz-se uma somatória de uns e zeros multiplicados por variáveis de pesos e que somados determinam um valor específico que quanto maior o valor, maior será a probabilidade de exercer um reconhecimento de um objeto. Quanto maior for o valor total da soma de uns e zeros e seus respectivos pesos, maior será a probabilidade de que o objeto observado seja realmente o objeto procurado.

Este modelo representa uma malha de neurônios, onde cada neurônio tem um determinado peso de probabilidade de ser ou de representar o objeto procurado. Quanto maior o peso, maior é a probabilidade de o neurônio reconhecer o objeto procurado. Uma somatória de pesos (probabilidades) e de uns e zeros, maior será a probabilidade de determinado objeto observado ser o objeto desejado.

Assim, as redes neurais são capazes de localizar e reconhecer determinado padrão procurado, de forma rápida e eficiente.

Trata-se de um modelo relativamente simples, e que imita o modelo de neurônios observado na natureza no cérebro de seres humanos e de animais. O Modelo de Redes Neurais é bastante simples e relativamente fácil de ser implementado. Onde a saída do sistema é um conjunto de valores de probabilidade de determinado objeto observado ser ou não ser o objeto procurado.

As Redes Neurais executam um comportamento claro de maneira a reconhecer padrões procurados e desejados. As Redes Neurais podem ser utilizadas para reconhecer qualquer tipo de padrão, inclusive sintomas de radiatividade e armas químicas, e também podem ser utilizadas para reconhecimento de objetos com determinada geometria e cores, de forma a reconhecer floradas específicas pelas abelhas ou objetos específicos pelos MAV.

As aeronaves MAV não devem processar as técnicas de redes neurais no próprio processamento, mas deve enviar o conjunto de uns e zeros para a Base e esta sim deve executar os algoritmos de processamento de redes neurais para responder para a MAV a nova missão que ela deve executar.

Os processamentos de redes neurais devem ser processados pela Base e não pela MAV porque se trata de um modelo de processamento e memória muito pesado, que necessita grandes valores de processador e de memória, e portanto, hardware de grande porte.

Assim todo o processamento de Redes Neurais deve ser executado na Base e, esta após o processamento deve e pode informar ao MAV a nova continuação da missão da aeronave.

Desta forma, como o processamento das Redes Neurais ser muito pesado e necessitar de hardware de grande porte e de software relativamente complexo e pesado, esta deve ser executada na Base e após a execução do algoritmo este deve após a tomada de decisão sobre a continuidade da missão, a Base passa a informar a MAV da nova missão a ser executada.

Assim a MAV não executa o processamento de redes neurais e sim quem executa é a Base. O que a MAV deve executar é fazer a leitura de uns e zeros e enviar este conjunto de uns e zeros para Base, e esta sim executa o algoritmo de redes neurais para realizar o conhecimento do padrão procurado e após esta operação a Base informa novamente a MAV sobre a nova missão a ser executada.

Como a Base opera com um enxame de diversos MAV, a Base tem que possuir hardware de processamento, memória e disco capazes de processar simultaneamente e em paralelo todas as redes neurais dos diversos MAV do enxame digital.

Portanto, a Base deve possuir uma capacidade de processamento e memória bastante grande para poder processar todas as redes neurais dos MAV em paralelo e sem atraso, o mais instantâneo possível.

3.2.3 Imagem e Visão

As abelhas utilizam-se de imagens e de visão para orientar seu sistema de controle e medição de voo, uma vez que o ambiente da natureza é muito diverso e complexo, o que dificulta o sistema de voo, caso este não seja capaz de se orientar através de imagens e visões de localização geográfica, de observação, de florada e de pólen. A visão nas abelhas é fundamental e se posiciona como um sensor captador e orientador dos sistemas de voo que as orientam de forma a permitir não somente encontrar flores ricas em pólen, mas também localizar seu caminho de volta para a colmeia.

Desta forma tanto a imagem quanto a visão são fundamentais para que as abelhas consigam realizar sua missão de localização da florada e colheita de pólen. Para localização da colmeia as abelhas utilizam-se do sinal eletromagnético emitido pela abelha rainha e também dos sensores de visão

Imagem e Visão são fundamentais tanto para as abelhas como também para os MAV poderem executar sua missão. Na grande maioria das missões que a Base orienta para os MAV executarem, estes necessitam de princípio de visão para se posicionarem no espaço de forma a poder ter sucesso na missão.

Imagem e Visão das abelhas são percebidas por um conjunto de sensores eletromagnéticos e nervosos para serem recebidos pelos cérebros das mesmas. E este conjunto de visão e neurônio nas abelhas permite que estas se localizem no espaço e localizem parte ou totalidade da missão.

Já Imagem e Visão nos MAV são percebidos como um conjunto de uns e zeros que são enviados para a Base e esta através de algoritmos de redes neurais conseguem identificar geometria e objetos procurados.

Portanto no caso das abelhas estas executam a percepção de imagem e visão por si só. No entanto, no caso dos MAV estes executa a percepção de imagem e visão na Base. A Base recebe os modelos de uns e zeros, executa os algoritmos de redes neurais e informam de volta o resultado para MAV em conjunto com a nova missão.

Neste modelo verifica-se que se trata de uma arquitetura distribuída e diferente do modelo biológico. Apesar de a arquitetura digital ser diferente da arquitetura biológica a eficácia e a eficiência na operação são bastante similares.

Imagem e Visão tanto no modelo biológico, quanto no modelo digital são fundamentais e essenciais para o sucesso na execução da missão. Seja na procura de floradas e localização de pólenes pelas abelhas no modelo biológico, quanto na execução de busca de objetos específicos pelos MAV no modelo digital.

Quanto melhor for o algoritmo de reconhecimento de objetos baseado em redes neurais, melhor será o sucesso na localização do que se procura. Ou seja, quanto melhor for a especificidade de uns e zeros e pesos de probabilidade das redes neurais, melhor será a resposta de identificação dos objetos procurados.

Ou seja, é preciso casar a arquitetura digital de imagem e visão com a arquitetura e algoritmo de reconhecimento de padrões de redes neurais. Quanto melhor for a resolução de imagem e visão, melhor será a resolução de uns e zeros e probabilidades de localização de objetos. Ou seja, apesar do algoritmo ser mais pesado em termos de processamento, melhor será a resolução e o sucesso na localização dos objetos procurados.

Assim, deve-se casar resolução de imagem e visão com especificidade dos algoritmos de processamento de identificação de objetos pelo MAV e pela Base. Quanto maior for a resolução de imagem e visão pelo MAV, maior será a probabilidade de sucesso na identificação de objetos pela Base.

3.2.4 Ressonância Cognitiva

O modelo de memória baseado em ressonância da estrutura cognitiva da mente, permite que em conjunto com as imagens e visão possam orientar a dinâmica de voo das abelhas, pois somente com uma memória cognitiva as abelhas teriam condição de voar e reconhecer padrões nos voos, de modo a localizar o mapa de comportamento dinâmico de voo. Sem um sistema de memória bastante eficaz dificilmente as abelhas teriam condição de se localizar em voo, uma vez que ela voaria “sem mapa”. A ressonância cognitiva opera como um grande mapa em memória nas abelhas.

Existem duas hipóteses para que as abelhas se localizem e localizem a posição da colmeia. A primeira hipótese, já relatada anteriormente, representa o modelo em que a abelha rainha mantém um sinal eletromagnético durante todo o tempo, para que as abelhas operárias e os zangões, através deste sinal eletromagnético possa localizar a posição geográfica da colmeia.

A segunda hipótese refere-se a uma capacidade de cognição da mente das abelhas que executam sua capacidade de localização espacial através de um modelo cognitivo e ressonante. Ou seja, a própria abelha guarda em si uma capacidade de orientação espacial devido à sua capacidade cognitiva em memória de localização espacial.

Como as abelhas são animais bem pequenos, seu cérebro e sua capacidade cognitiva são também diminutas o que nos faz pensar que o modelo de envio de mensagem constante pela abelha rainha seja mais provável de ser o modelo real.

No entanto, não se deve descartar o princípio de memória ressonante cognitiva. Para um MAV é muito pouco provável que se use um modelo ressonante cognitivo pois exigiria uma capacidade de processamento e de memória ou mesmo de ressonância muito pesado em termos de algoritmo.

Assim, para aeronaves MAV é mais indicado a utilização de sinal eletromagnético de referência a partir da Base, similar ao modelo teórico da abelha rainha.

Tanto o modelo cognitivo das abelhas, quanto o modelo eletromagnético da abelha rainha pode ser imitado através de MAV, contudo como dito anteriormente o modelo eletromagnético de sinal de referência é mais eficiente, pois utiliza uma capacidade de processamento e memória nas aeronaves bem menor, e portanto, as aeronaves MAV podem ser menores e mais leves.

O Modelo de Ressonância Cognitivo é bem elegante e sofisticado, exigindo uma capacidade de processamento pesada em relação ao Modelo de Sinal de Referência a partir da Base. O Modelo de Ressonância Cognitivo pode ser utilizado para localizar uma aeronave MAV no conjunto enorme de várias aeronaves em um enxame de MAV.

Assim, um Modelo MAV mais interessante e mais otimizado utiliza a Ressonância Cognitiva para localizar uma aeronave imersa num grande enxame de MAV, mas não utiliza esta mesma técnica para o envio de novas missões de voo.

Utilizando-se desta forma da Ressonância Cognitiva para localização e identificação de aeronaves específica, mas não utiliza a mesma técnica para enviar operações de controle.

No caso de se utilizar a Ressonância Cognitiva para localizar uma MAV específica, a MAV deve possuir, dentro de sua carcaça mecânica, um circuito eletromagnético e ressonante que a identifica como única e desta forma pode ser utilizado para reconhecimento do sistema e/ou da aeronave MAV escolhida.

Assim, cada MAV do mesmo enxame possui um circuito eletrônico de ressonância que a torna como única dentro deste enxame de operação, e deste jeito, a Base consegue localizar um MAV específico dentro de um grande enxame de MAV.

3.2.5 Memória e Aprendizado

O modelo de ressonância cognitiva leva ao processo de mapeamento em memória espacial e também orienta no aprendizado para localização espacial de novas floradas; isto posto, pode-se afirmar que o conjunto de visão, memória e redes neurais levam as abelhas a um excelente aprendizado para localização e voo no destino desejado. Um MAV pode usar recursos dos sensores para “aprender” uma localização de objetivo específico para uma missão de voo desejada.

Contudo, como o Modelo de Aprendizado dos MAV se encontra armazenado na Base, esta precisa estar operando o princípio de aprendizado de redes neurais o tempo todo em consonância com os MAV.

No modelo biológico o aprendizado é realizado pela própria abelha operária e pelos zangões e seus sistemas cognitivos, no entanto, no caso do Modelo MAV o aprendizado baseado em

Redes Neurais não ocorre na aeronave e sim na Base. Isto posto para que a MAV possa ser mais leve e possuir menor tamanho geométrico.

Assim tanto a memória quanto o aprendizado de um Sistemas MAV – Base ocorre na Base e não nas aeronaves. As questões de complexidade de algoritmo, de dimensão de memória e de capacidade de aprendizado não podem ser armazenadas nas MAV, pois estas têm que ser o quanto menor, quanto mais leve e quanto mais simples melhor.

Desta forma memória e armazenado são dois recursos necessários que não podem ser executados nem processados nas aeronaves MAV, isto posto, todos os recursos incluindo algoritmo de aprendizado, técnicas de redes neurais de reconhecimento de padrões e exigências de memória devem ser armazenadas e processadas na Base, pois esta pode ser dimensionada de acordo com a necessidade inclusive em relação ao número total de aeronaves comandadas pela Base.

Cabe às aeronaves MAV realizar a leitura e uns e zeros de visualização de imagem e transmitir este conjunto de uns e zeros lidos pelo sistema de imagem para a Base através de um envio através de ondas eletromagnéticas das antenas dos MAV para as antenas da Base.

Ou seja, a necessidade de memória nos MAV é mínima, bastando a existência de um delay para o envio dos sinais para a Base.

É através deste delay entre recepção de envio dos sinais de uns e zeros que exige na necessidade mínima de hardware presente no MAV, uma vez que todo o grande e pesado processamento ocorre na Base.

A missão de voo do MAV deve ser escolhida e decidida através da recepção de um código eletromagnético recebido da Base. Recebendo este código eletromagnético o MAV passa a saber qual é o modelo de voo que deve executar.

Assim as aeronaves MAV são geometricamente volumosas e leves o menor possível, de forma que a MAV é praticamente uma Máquina de Estado, onde cada estado deve ser executado de

acordo com o código eletromagnético recebido pela Base.

A Máquina de Estado que corresponde ao modelo de funcionamento da aeronave MAV opera de acordo com cada código recebido. E toda Memória e Aprendizado de Voo se sustenta e se mantém na Base para todas as aeronaves do enxame, simultaneamente e em paralelo.

Caso a Memória e o Aprendizado não se estabelecesse na Base, mas sim nas aeronaves MAV, estas teriam que ocupar hardware complexo e pesado e software complexo. Portanto esta opção deve ser descartada.

Deve ocorrer uma sintonia simultânea e contínua entre as aeronaves MAV e a Base, ou seja, as MAV se mantêm “conversando” o tempo todo, trocando informações sob o ambiente a ser pesquisado e objetos procurados e informações pertinentes a esta pesquisa e a este ambiente.

Ou seja, as MAV não guardam as informações nelas, mas sim enviam as informações diretamente para a Base, e esta executa a avaliação e a recodificação do que se deve exercer e reenvia novos comandos para o novo voo das MAV.

É como o nosso modelo cognitivo: os olhos e os ouvidos recebem os sinais visuais e acústicos o tempo todo e envia imediatamente estes sinais para o cérebro e este executa o serviço de cognição e reenvia o comportamento muscular para uma nova atitude. Ou seja, os MAV são os olhos e os ouvidos do sistema e a Base é o cérebro do sistema.

3.2.6 Mecanismo de Foto-deteção

O mecanismo de foto-deteção das abelhas baseado em sistemas ópticos e nervosos, capacitam o sistema de Imagem e Visão que junto com o sistema de Ressonância Cognitivo tornam o ambiente observado conhecido e reconhecido.

Desta forma as abelhas utilizam o sistema óptico e o sistema cognitivo neuronal através de um sistema nervoso e um conjunto de neurônios que realizam todo um processo de reconhecimento executado pelas abelhas operárias.

Já o sistema artificial das aeronaves MAV não usam o mesmo sistema dentro de uma mesma aeronave, mas sim utilizam o sistema e o mecanismo de foto-deteção baseado em uns e zeros e esta sequência e conjunto de uns e zeros deste mecanismo de foto-deteção que passa a ser enviado para a Base e esta Base realiza através de técnicas de redes neurais transformando o mecanismo de foto-deteção em um mecanismo de reconhecimento de padrões transformando o sistema de foto-deteção em um sistema de reconhecimento da modelo visual em um modelo de reconhecimento de objetos, de fontes de radiação, de armas bioquímicas, entre outros.

Assim da mesma forma que as abelhas exercem o mecanismo de foto-deteção para localizar floradas desejadas e também a localização da colmeia, o sistema dos MAV exercem através de um mecanismo casado com a Base para transformar o mecanismo óptico em um mecanismo artificial de localização de objetos procurados e desejados. Sejam eles objetos físicos, como bioquímicos.

O mecanismo biológico e o mecanismo artificial possuem o mesmo objetivo de localização de floradas ou de objetos físicos ou bioquímicos, porém utilizam estratégia de arquitetura lógica diferentes, uma vez que o processo cognitivo ocorre dentro do cérebro da própria abelha e no caso artificial ocorre no sistema lógico da Base.

A localização de imagens através do mecanismo de foto-deteção nas abelhas é diferente da localização de imagens baseada num modelo digital de uns e zeros. Contudo, é fantástico saber que diferentes estratégias sejam elas biológicas e ou tecnológicas ambas possuem a mesma missão, o mesmo objetivo, mas diferentes estratégias de operação.

O modelo fisiológico das abelhas e o modelo tecnológico das MAV tem exatamente a mesma estrutura lógica de visualização e reconhecimento, contudo, nas abelhas a estrutura lógica fica no cérebro neural delas e nos MAV fica na Base.

Assim, um mesmo objetivo, e uma mesma missão, contudo com estratégias e estruturas lógicas distintas. Não se pode dizer que uma estrutura é melhor que a outra ou vice-versa, porém pode-se defender a tese que ambas as arquiteturas e estratégias lógicas atingem sua meta de forma adequada.

Desta forma, pode-se dizer que ambas as estratégias e ambas estruturas físicas, tecnológicas, fisiológicas e bioquímicas conseguem executar sua missão de maneira satisfatória e adequada.

Qualquer mecanismo de foto-deteção exerce sua função de forma adequada, tanto no modelo tecnológico, quanto no modelo biológico. Evidentemente que uma possível estrutura tecnológica que emite a estrutura biológica deve ser construída de maneira a imitar satisfatoriamente, onde a tecnologia copia a biologia de forma biomimética.

O biomimetismo deve ser exercido não somente em alguns casos, mas em todo um conjunto de biomas tanto de animais de pequeno porte quanto de grande porte. A Engenharia Mecânica e a Engenharia Eletrônica têm muito o que aprender com uma hipotética cadeira de Engenharia Biônica.

Minha tese defende drasticamente a construção e o desenvolvimento desta nova e hipotética cadeira de Engenharia Biônica e Biomimética.

3.2.7 Eletrônica Biomolecular

Os sistemas de foto-deteção, de imagem e visão, de ressonância cognitiva, de memória e aprendizado, atuando de forma conjunto capacita as abelhas através deste modelo de eletrônica biomolecular a se localizarem em voo, a “mapear” o ambiente natural, a localizar seu retorno para a colmeia, a se equilibrar em voo, a acelerar ou frear um movimento de voo, a realizar guinada no sentido horário ou anti-horário, a realizar um voo VTOL (Vertical Take Off and Landing), a trabalhar de forma otimizada, orientando o sistema de controle de voo, ou seja, a cumprir sua missão.

Todas estas características permitem a eficaz execução de sua missão, seja ela qual for. Assim, esta eletrônica biomolecular permite a realização total e eficaz de suas atividades mapear e

exercer sua missão.

Como já dito anteriormente, o mapeamento biomolecular eletrônico através de ressonância cognitiva permite a correta execução da missão a qual ela for responsável por executar. No entanto, no caso das MAV, a inteligência da operação não fica no corpo físico das aeronaves, mas sim na Base.

Este modelo de eletrônica biomolecular executa e exerce a atividade biológica e cognitiva de maneira a construir as atividades responsáveis para o exercício da missão, seja ela qual for. No caso das aeronaves MAV o exercício ocorre na construção do Modelo de Ressonância Neural na estrutura eletrônica e algorítmica da memória da Base.

Esta estrutura eletrônica distribuída permite que a Eletrônica Biomolecular seja construída de maneira racional, pois o sistema de captação de sinais fica na nas aeronaves enquanto que o sistema de inteligência fica na Base. Esta distribuição capacita a diminuição do tamanho e da memória das aeronaves e permite que o maior peso e maior complexidade de hardware e software fiquem na Base.

A Eletrônica Biomolecular com arquitetura distribuída entre as aeronaves e a Base com as aeronaves leves e a Base complexa mostram que o biomimetismo é fundamental na execução segura e correta de qualquer que seja a missão. Quanto mais complexa for a missão, mais complexa se torna a operação na Base e mais inviável seria se esta missão fosse planejada e sustentada na aeronave. Assim, como no caso das abelhas ocorre a eletrônica biomolecular no cérebro da abelha operária, no caso das MAV, este planejamento e sustentação não ocorre na aeronave, mas sim na Base. Quanto mais complexo for a operação, maior será a necessidade de hardware e de software potente para executar o planejamento da missão.

Esta eletrônica biomolecular que fica armazenada nas abelhas operárias, no caso artificial fica na Base e, portanto, trata-se de uma tecnologia biomimética, contudo distribuída. As abelhas conseguem exercer sua obra sem se comunicar com a colmeia, contudo as aeronaves MAV não,

Este modelo artificial que imita o modelo biológico serve para realizar diferentes missões,

sejam elas localização de fontes radiativas, fontes explosivas, fontes de armas bioquímicas, objetos com qualquer tipo de geometria e ou função,

Contudo, o modelo biológico tem suas missões relativamente restritas, enquanto, que o modelo artificial pode um conjunto de missões com variedade bem maior, pois a capacidade de programação da Base é bem mais extensa.

Por exemplo, a Base pode orientar uma missão para localizar uma bomba, contudo a quantidade de variação geométrica da bomba pode ser bem extensa e complexa. Assim, a Base pode inicialmente fornecer características A e B para localizar a bomba. Caso a bomba com estas características não sejam localizadas, a Base pode fornecer novas características, por exemplo C e D. E este procedimento pode continuar em restrições e sem limites.

Já no caso biológico das abelhas, estas procuram floradas específicas sem receber novas orientações da abelha rainha. A abelha operária busca a florada por si só, sem interferência externa ou de outra abelha.

Desta maneira, pode-se perceber que o modelo artificial possui maior flexibilidade do que o modelo biológico, podendo redirecionar sua missão a qualquer tempo.

3.3.1 Sistema de Navegação

O “Mapa” ou melhor a memória de navegação das abelhas é baseada neste conjunto de variáveis exposta no item anterior, no entanto, para uma aplicação em MAV, outros recursos tecnológicos podem ser empregados, entre eles eletrônica digital, que permite a partir de um sistema eletrônico de visão, mapear objetos, obstáculos, locais para pouso, locais para evitar pouso, entre outros.

A capacidade de localização no espaço e navegação está totalmente associada a localização das abelhas em relação ao seu espaço, seja ele, em relação a floradas, em relação a colmeia, ou em relação a outras abelhas. As abelhas utilizam-se de um conjunto de variáveis de controle e

navegação que permitem seu posicionamento no espaço físico. Esta localização espacial está associada a montagem do mapa de posicionamento físico.

Desta forma, as abelhas operárias e os zangões conseguem se posicionar no espaço através de um mapa de posicionamento espacial. Este mapa constrói um sistema de navegação que permite a elas se localizarem no espaço físico. Quanto maior for o número e a quantidade de variáveis maior será sua capacidade de identificação espacial e melhor e mais fácil será sua localização.

Isto também ocorre em relação aos MAV, pois quanto maior for a quantidade de objetos localizados no espaço ao redor da aeronave, melhor será sua capacidade de localização no espaço. Por exemplo, caso o MAV localize um objeto específico, como por exemplo, uma fonte de radiação, melhor será seu posicionamento espacial em relação a este objeto.

Da mesma forma, se o MAV localizar uma bomba bioquímica, e após esta localização ela se desloque na direção sul norte, a MAV saberá que se ela se deslocar na direção norte sul, irá encontrar novamente a bomba bioquímica.

Quanto maior for a quantidade de objetos localizados no espaço físico, melhor será sua capacidade de se posicionar no espaço de maneira adequada. Ou seja, quanto maior for o número de objetos conhecidos, melhor será capacidade de localização no espaço físico.

Assim, como as abelhas se posicionam no espaço através de sinais eletromagnéticos e sua capacidade de visão, também as aeronaves MAV se posicionam através de objetos localizados espacialmente.

Por exemplo, uma abelha operária localiza uma florada. Esta abelha pode se afastar na direção leste oeste em posicionamento de outra florada. Caso ela não localize outra florada ela pode voltar na direção oeste leste e se posicionar novamente em colheita de pólen para captar a florada anterior.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Esse sistema de navegação, tanto nas abelhas, quanto nos MAV é extremamente eficiente e permite total sucesso na operação da missão a qual ela está orientada a realizar.

No caso dos MAV, a Base pode modificar a missão da aeronave e redirecionar a operação de navegação da aeronave em uma nova direção e um novo sentido. Ou seja, a Base pode direcionar a MAV para uma nova direção do Sistema de Navegação.

O fato de a Base possuir todo um banco de dados de navegação das diversas aeronaves MAV, este permite um modelo de navegação totalmente diferente aos realizados anteriormente. O Modelo de Inteligência da Base e seu Banco de Dados, com suas respectivas quantidades de missões, faz com que a MAV orientada execute e exerça um Sistema de Navegação totalmente diferente aos realizados anteriormente.

Assim, como toda a inteligência de voo das aeronaves MAV se encontram dentro do Banco de Dados da Base, esta pode exercer qualquer tipo de missão nova ou antiga e faz com que todas as MAV possam vir a executar um caminho totalmente novo e inusitado.

Ou seja, a MAV pode vir a executar uma Sistema de Navegação não repetido, mas sim extremamente novo e desta forma, permite voo em qualquer direção, em busca de qualquer objeto, em busca de qualquer fonte de radiação ou de bomba bioquímica.

O Sistema de Navegação das abelhas operárias também permite construir um novo sistema, contudo o foco de navegação da abelha está limitada a reconhecer novas floradas e localizar novamente a colmeia.

As aeronaves MAV podem ter um sistema de navegação muito mais complexo, pois pode vir a localizar um conjunto muito maior e mais complexo de objetos e de armas. Os objetos que devem vir a ser reconhecidos pelas MAV possuem geometrias, cores e modelos físicos muito mais diversos e diferentes que o do universo das abelhas.

Quanto maior e mais complexo for o ambiente da software e hardware da Base, maior e mais complexo será sua capacidade de localização de diferentes objetos, e assim, maior será sua gama de atuação.

3.3.2 Sensor de Posição e Orientação

Os sensores de posição e orientação dos MAV são baseados em modelos matemáticos e orientação espacial, tais como giroscópios, altímetros, GPS, entre outros; já nas abelhas entendemos que a orientação espacial é composta por um conjunto entre visão, vibração de comunicação com outras abelhas, sistema de labirinto da audição. Com estes Modelos em combinação as abelhas conseguem se localizar e orientar. Trata-se de 2 modelos bem distintos que podem vir a ser novamente estudados, pois pensamos que há uma vantagem biofísica das abelhas em seus sistemas de posição e orientação.

Assim, todos os sistemas de posição e orientação são localizados nas aeronaves MAV, contudo o Banco de Dados com o histórico de posição fica instalado na Base. Ou seja, os sensores de posição e orientação captam as informações do meio e imediatamente enviam estas informações para a Base, e esta guarda o histórico de dados e informações de forma a poder gerenciar o modelo de voo planejado e orientado para a aeronave. Já no caso das abelhas os sensores são posicionados na própria abelha e ela é quem decide se deve subir, ir em frente, voar VTOL, voar pairado ou outros.

Ou seja, a abelha possui autonomia de voo para qualquer tipo de planejamento, já a MAV não. Esta deve seguir o planejamento e a orientação da Base.

Quanto maior for a complexidade de hardware e software, maior é a inviabilidade de posicionar o planejamento na própria MAV, assim deve ser construído e posicionado os sensores de posição e orientação como uma máquina de estado, totalmente dedicado e simples, de maneira que estes sensores recebem a informação e imediatamente enviam esta informação, sem armazenar na aeronave, para a Base de forma que esta sim pode compreender a leitura dos sensores e tomar uma nova decisão sobre uma nova missão.

Por exemplo, a MAV pode ser uma máquina de estado que procura o tempo todo uma fonte de energia térmica de 70 Graus Celso. Esta é uma MAV totalmente específica que busca

exclusivamente uma fonte com esta característica. E fica o tempo todo informando a Base sobre se achou ou não achou uma fonte com esta propriedade.

Outras fontes podem ser buscadas durante o tempo todo, mas sempre com uma MAV específica, pois o hardware e o software devem ser simplificados, pequenos e leves.

Quanto mais específico for o MAV, mais simples, menor e mais leves serão o hardware e software da aeronave, permitindo que a complexidade fique instalada na Base.

Assim, máquinas de estado com metas predeterminadas são extremamente eficientes e permitem a realização de sua operação e sua missão com maior probabilidade de sucesso. Desta forma, é interessante que a Base possa gerir todo um conjunto de MAV com diferentes missões e diferentes planejamentos. Ou seja, pode-se ter uma Base que gerencie 5, 10, 20 ou mais aeronaves MAV com diferentes missões em paralelo e simultaneamente, de maneira a acelerar a busca dos objetos de interesse da Base.

Desta maneira a operação da Base é otimizada e acelerada, pois permitem a multiplicação de funções e de missões que venham a ser realizadas em paralelo.

Diferentemente do caso das abelhas, onde estas possuem uma única missão que é localizar e buscar pólen em floradas específicas. Após localizar uma florada de interesse, as abelhas operárias que a localizaram, emitem um sinal eletromagnético para outras abelhas operárias para que estas venham a colaborar na colheita do pólen e levar este pólen para a colmeia, onde serão processados para fabricação de mel.

3.3.3 Sonar

As abelhas utilizam-se do modelo de sonar para duas atividades: A primeira atividade é utilizada para se comunicar através de diferentes frequências com outras abelhas da mesma colmeia; a utilização do sonar também é realizada para localizar e analisar distâncias de voo para um obstáculo, para uma florada ou para o retorno à colmeia.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

O modelo de sonar das abelhas é fundamental para a comunicação das abelhas operárias com outras abelhas operárias e também entre zangões e outras zangões no voo nupcial com a abelha rainha.

Este modelo de sonar também é utilizado para que a abelha rainha informe através do Efeito Doppler a posição da colmeia.

Quanto mais agudo for a frequência do Efeito Doppler, mais será a aproximação para com a colmeia e quanto mais grave for a frequência do sinal do Efeito Doppler, mas a abelha estará se afastando da colmeia.

Desta forma, o sonar é extremamente importante, pois é através dele que a abelha operária e a abelha zangão conseguem se posicionar uma em relação as outras e também em relação a colmeia.

O Sonar é fundamental para que as abelhas se localizem no espaço, tanto em relação a outras abelhas, como em relação a abelha rainha e a colmeia.

Sem o sonar a abelha operária ficaria perdida espacialmente.

No caso dos MAV, as aeronaves podem utilizar sistemas de som que permitem a leitura e interpretação de informações sônicas, quanto também podem usar sistemas eletromagnéticos para a interpretação de informações eletromagnéticas.

Assim os MAV podem usar sinais de sonar e sinais eletromagnéticos. No caso das abelhas, estas utilizam prioritariamente sinais eletromagnéticos captados pelas antenas. É importante saber que são um para de antenas pois se fosse apenas uma antena, o sinal não seria capaz de ser identificado a direção de origem do mesmo. É importante entender que o sinal eletromagnético captado pelas antenas por serem duas antenas consegue-se identificar a direção de onde o sinal é enviado.

No caso das abelhas os sinais são interpretados por elas e elas decidem se devem ou não informar outras abelhas operárias. Já no caso dos MAV estes não guardam a informação, mas sim, informam imediatamente a observação realizada para a Base e estas decidem se deve ou não informar as outras abelhas operárias com uma nova missão.

O Sistema de Sonar da MAV é extremamente dedicado para que se possa consumir o mínimo possível de peso tamanho e volume. Opera como uma máquina de estado que realiza a transferência de informação o tempo todo para a Base sem parar.

Esta montagem de máquina de estado, faz com que a comunicação com a Base ocorra de forma instantânea e contínua. Permitindo que a Base sim, desenhe uma nova estratégia e uma nova missão a ser realizada pela mesma MAV ou por outras aeronaves MAV escolhidas.

3.3.4 Audição

As abelhas utilizam-se da vibração acústica através do par de antenas que percebe diferentes frequências de comunicação. Esta comunicação ocorre tanto com relação à outras abelhas da mesma colmeia, como para informar as mesmas que existe uma florada localizada a uma distância x , y ou z da colmeia.

É interessante observar que este mecanismo de comunicação das abelhas entre si permitem uma sociedade de seres e sistemas extremamente cooperativa e consolidaria. Através deste sistema de audição realizado pelas antenas das abelhas estas conseguem se comunicar mesmo que a grandes distâncias, e faz-se com que trabalhem de forma extremamente solidária e coletiva.

Sem um eficiente sistema de comunicação coletivo, as abelhas operárias jamais teriam sucesso na execução de sua missão de colheita do pólen nem da fabricação do mel. Ou seja, as abelhas ajudam umas às outras de forma que o trabalho coletivo seja extremamente bem realizado e com total sucesso.

Um sistema de audição eficiente se torna um enorme pré-requisito para o bom sucesso da missão. Isto posto, observa-se que nos MAV a comunicação também é fundamenta, tanto para a Base poder “ouvir”, quanto poder planejar e poder orientar as missões de cada aeronave MAV.

Desta forma tanto no caso das abelhas quanto no caso dos MAV o sistema de audição eficiente seja ele por sonar ou eletromagnético é fundamental para a correta e eficaz realização da missão ao qual o sistema se preste a realizar.

É interessante observar que em todos os animais o sistema de comunicação utiliza dois receptores (antenas ou ouvidos). Pois se utilizam-se apenas um sistema de recepção, o animal não conseguiria localizar a direção de origem do som ou do sinal eletromagnético “ouvido”.

O sistema de audição, no caso dos seres humanos, hospeda também o labirinto de forma a ser fundamental no equilíbrio e movimento espacial.

3.3.5 Detecção Acústica

A detecção acústica das abelhas é baseada na vibração e na ressonância que atingem as antenas ou melhor, o par de antenas, que ao vibrar e ressoar percebem a comunicação de diferentes frequências sônicas e desta forma se comunicam entre si. Esta detecção acústica que ocorre através das antenas das abelhas, permitem não somente receber uma resposta acústica e sônica, mas também operam de forma a compreender a localização geográfica de algo importante, como por exemplo, a localização de uma florada ou a localização da colmeia ou mesmo de um perigo iminente.

O sistema de detecção acústica nas abelhas opera de forma a utilizar a ressonância sônica e também a ressonância eletromagnética para a bem sucedida comunicação entres elas. Sem este eficiente sistema de comunicação o voo coletivo do enxame de abelhas não seria possível, pois as abelhas operárias iriam se colidir umas contra as outras.

No caso do voo coletivo dos MAV, isto também ocorre e a forma de evitar colisões é a utilização do princípio do Efeito Doppler que permite monitorar a aproximação das aeronaves e também o afastamento, de uma nave contra a outra.

A Modelagem do Voo Coletivo não é um sistema simples, mas sim precisa ser trabalhado de forma a controlar as multi-variáveis de voo das muitas aeronaves. Quando uma nave se aproxima da outra o sinal de referência do Efeito Doppler se torna mais agudo; quando uma nave se afasta uma da outra o sinal de referência do Efeito Doppler se torna mais grave. Ao monitorar esta variação de agudos e graves, consegue-se através de um efeito dominó proteger a realização do voo coletivo. Sem um sistema de detecção acústico eficiente e coletivo, isto não seria possível.

Este modelo baseado em Efeito Doppler e em um princípio de movimento dominó somente seria permitido para realizar o voo coletivo, seja das abelhas, quanto das aeronaves artificiais das MAV.

3.3.6 Gravidade

As abelhas executam um comportamento senoidal de suas asas, ou seja, quando as asas descem a favor da gravidade, ocorre uma sustentação vertical para cima baseada no arrasto da asa contra a atmosfera.

Já quando as asas sobem estas trabalham contra a gravidade, no entanto, o perfil das asas para subida geram um arrasto mínimo para baixo, o que faz com que a sustentação negativa seja mínima ou até mesmo nula.

Assim, quando a asa atua a favor da gravidade, realiza sustentação máxima e arrasto vertical máximo para cima; já quando a asa atua contra a gravidade, realiza arrasto para baixo na mesma direção da gravidade, contudo o arrasto é mínimo devido ao posicionamento do ângulo de ataque da asa na vertical.

A combinação entre arrasto máximo na descida e arrasto mínimo na subida permite a ocorrência de um arrasto médio positivo para cima, realizando assim a sustentação das abelhas em

voo.

Com este princípio de torsão da asa, as abelhas conseguem realizar tanto o voo pairado, quanto o voo VTOL. Com uma pequena defasagem entre uma asa e outra este permite à abelha um voo guinado.

Assim, é graças a diferença de fase e a diferença de ângulo de ataque para cima ou para baixo, as abelhas conseguem executar um voo desejado.

Um ângulo de ataque próximo de 90 graus para cima gera um arrasto mínimo para baixo e com um ângulo de ataque próximo de 180 graus gera um arrasto máximo para baixo e consequentemente cria um empuxo máximo para cima.

Assim, estes sistemas de torsão das asas utilizado na grande maioria de insetos e fundamentalmente pelas abelhas, fazem com que estas operem voo de forma bem eficiente.

O modelo de voo das abelhas em relação ao sistema de batimento das asas é complexo para ser instalados em máquinas de grande porte, pois o momento de inércia das asas, para sistemas grandes, é muito alto.

Em tese é possível construir uma asa para operação de batimento das abelhas, contudo esta necessita de uma longarina bastante resistente, pois a força de arrasto é bastante alto. Além disso as abelhas operam com frequência de batimento na ordem de 190 Hz o que exige um sistema de alavanca e de flexão bastante robusto.

Outro problema está associado à fadiga de batimento das asas. Observa-se que na natureza apenas os insetos utilizam este modelo de torsão. As aves trabalham com batimento pontual, mas

jamais numa frequência tão alta de 190 Hz.

A natureza desenvolve diversos modelos de voo vertical seja nos insetos, seja nas aves, mas observa-se facilmente que o voo da abelha é totalmente distinto ao voo da águia.

Vencer a gravidade pode parecer simples se observarmos o voo das abelhas, contudo, é bastante complexo, quando se pretende adaptar o sistema de voo das abelhas para uma aeronave artificial não MAV.

O sistema de torsão das asas das abelhas pode ser adaptado a uma aeronave MAV que use como sistema de batimento um circuito eletrônico piezo-elétrico. Com um sistema piezo-elétrico a aeronave MAV pode executar a torsão e o batimento da asa de forma a atingir esta frequência próxima a 190 Hz, isto para sistemas pequenos, já para sistemas maiores isto é mais improvável.

3.3.7 Algoritmo de Navegação

Pode-se dizer que as abelhas trabalham, voam e pousam baseado em uma lógica funcional capaz de guiá-las na navegação aérea de forma a procurar floradas, colher pólen, voar até a colmeia e depositar o pólen nas células hexagonal e repetir o processo inúmeras vezes. Ou seja, pode-se pensar que as abelhas voam baseadas numa lógica que pode ser traduzida numa missão de voo específica para aeronaves MAV que venham a imitar determinado padrão de voo ou determinada missão de voo. Ou seja, esta missão de voo pode ser representada e analisada como um algoritmo de voo.

O algoritmo de voo das aeronaves MAV é baseada na missão orientada pela Base, de forma que se inicia uma procura ou busca das aeronaves em direção a um objeto procurado ou interessado, ou seja, a MAV voa pra frente, pra cima, para baixo, em guinada sempre em busca da execução da missão que a Base ordenou.

As abelhas voam sempre em zigue zague buscando encontrar a florada e colher o pólen, contudo as aeronaves MAV não precisam fazer este voo em zigue zague o tempo todo, porém

somente enquanto não encontra o objeto procurado.

Quanto mais difícil for a localização do objeto procurado, maior será a continuidade de voo em zigue zague, contudo quanto o objeto for encontrado, a MAV informa a Base do sucesso da missão e esta decide se informa outras aeronaves MAV para que elas voem também até o objeto encontrado. A partir deste momento as aeronaves não voam mais em zigue zague mas direcionam sua flutuação aérea na direção do objeto.

Desta forma há algoritmos de voo baseado em busca ainda não localizada e há também algoritmos de voo em direção à busca já localizada.

O algoritmo de voo baseada em busca ainda não localizada faz com que a MAV opere em zigue zague, ou seja, voo guinado a direita e voo guinado a esquerda.

O voo guinado a direita ocorre com um empuxo da asa propulsora esquerda para trás. Enquanto que o voo guinado a esquerda ocorre com um empuxo da asa propulsora direita para trás.

Quando a asa propulsora esquerda realiza o empuxo para trás, a MAV gira no sentido horário, visto de cima para baixo. Já quando a asa propulsora direita realiza e empuxo para trás, a MAV gira no sentido anti-horário, visto de cima para baixo.

O movimento de zigue zague, seja na abelha quanto na aeronave MAV é fundamental para que tanto a abelha localize sua florada desejada, quanto para que a MAV localize seu objeto de pesquisa.

Desta forma cabe a Base enviar para a aeronave MAV o perfil de voo do algoritmo. Não vale a pena para a aeronave MAV salvar ou ter salvo dentro de sua memória de voo os diferentes perfis de busca e lógica de voo. Ou seja, quem armazena os diferentes sistemas e algoritmos de voo é a própria Base. Quando a aeronave MAV informa o sucesso ou não da missão, cabe a Base decidir a nova estratégia e enviar o algoritmo certo para a aeronave.

Assim, todos os diferentes sistemas e algoritmos de voo não estão armazenados nas aeronaves, mas sim na Base e esta sim decide qual algoritmo de voo deve ser utilizado pelas diferentes aeronaves e assim a Base transmite para a aeronaves específica qual deve ser a nova missão e o novo algoritmo a ser executado pela MAV em questão.

Ou seja, a inteligência do sistema está todo armazenada na Base e a execução dos diferentes algoritmos não é realizado pela Base, mas sim realizada pelas diversas MAV. Assim, o executor é a aeronave e o planejador e estrategista é a Base.

Quanto mais complexo o algoritmo, mas se torna inviável sua armazenagem nas aeronaves. E mais dedicado deve ser sua Máquina de Estado, de forma que assim, como as abelhas operárias, a MAV deve ter apenas uma missão de cada vez. A abelha operária exerce uma única missão o tempo todo, dividido em cinco fases: encontrar florada desejada, não se chocar com outras abelhas operárias em voo, informar as outras abelhas da florada encontrada, levar o pólen para a colmeia e produzir o mel. Da mesma forma a missão das MAV pode ser dividida em algumas fases e procedimentos, contudo o algoritmo que a Base envia para que a MAV exerça deve ser o mais simples possível, para que não se seja necessário a ocupação de grandes memórias na aeronave.

Quanto menor for o algoritmo e quanto mais simples for sua execução, mais interessante se torna por realizar e necessitar uma pequena ocupação de memória para armazenagem e para a execução do software.

Ou seja, é fundamental que o algoritmo seja enxuto para que ele ocupe o mínimo de memória possível, tanto na armazenagem e execução da MAV quanto na transferência do algoritmo da Base para a aeronave MAV.

3.4.1.1 Vibração

O modelo de flap de asa das abelhas, ou seja, o modelo de batimento das asas das abelhas executa uma característica inevitável de vibração por toda sua volta esférica, o que significa que ao bater as asas estas provocam a vibração mecânica do ar e da atmosfera em seu entorno. Contudo,

pode-se verificar em relação ao Número de Reynolds, que compara a relação entre forças de inércia e forças viscosas que este é um valor baixo o que significa que a vibração atmosférica em torno das abelhas possui um Número de Reynolds baixo ou seja baixas forças de inércia quando comparadas a forças viscosas.

Ou seja, devido ao batimento das asas em torno de 190 Hz este batimento gera uma grande vibração no corpo da abelha. Ocorre, portanto, um modelo vibracional tão intenso não devido a amplitude de movimento, mas sim, devido a velocidade de frequência.

Quanto maior for a frequência de vibração, mais intensa será sua força de vibração, e maior será sua ressonância e velocidade de batimento. Uma frequência de vibração em torno de 190 Hz para um corpo de 16 a 22 gramas de peso realiza um movimento de batimento e vibração relativamente intenso.

Assim, pode-se dizer que a vibração sobre as abelhas é relativamente elevada. Se pensarmos sobre o modelo de voo dos MAV, onde-se estabelece um sistema piezo-elétrico de vibração e movimento das asas pode-se saber que sobre o movimento piezo-elétrico ocorre também um elevado modelo de vibração, e sobre este a vibração transmite-se para o corpo do MAV.

O modelo de vibração também realiza um princípio de fadiga sobre as asas e sobre a articulação das asas. O sistema piezo-elétrico de vibração deve também ser bastante robusto para evitar que ocorra fadiga sobre as asas e sobre suas articulações. Ou seja, o sistema de articulação das asas das abelhas é bastante similar ao sistema de articulação dos MAV, no entanto, nas abelhas existe um tecido nervoso e articulado e nos MAV existe um sistema piezo-elétrico.

Em ambos os casos o Modelo de Vibração é responsável por uma intensa vibração e articulação do tecido nervoso no caso das abelhas e sistema piezo-elétrico no caso dos MAV. A vibração é transmitida das asas para as articulações e das articulações para o corpo das abelhas e dos MAV.

Desta forma, os MAV vibram intensamente em ressonância com as asas e deste modo, os MAV devem ser construídos de maneira a suportar e sustentar a vibração transmitida para ele. Ou

seja, o corpo do MAV tem que ser capaz de responder bem a fadiga gerada pela vibração das asas.

Em relação ao corpo das abelhas isto também se sustenta, ou seja, a vibração das asas é transmitida através do tecido de articulação das mesmas e alcança o corpo das abelhas de maneira a gerar uma forte vibração para este.

Tanto no caso das abelhas, quanto no caso dos MAV a vibração das asas é transmitida para o corpo destes. A vibração transmitida para o corpo das abelhas e dos MAV precisa ser capaz de se sustentar sem que ocorra fratura ou mesmo fadiga.

Graças ao reforço existente nas asas tanto das abelhas quanto dos MAV não ocorre fratura nem fadiga em nenhum dos dois sistemas.

3.4.1.2 Propulsão

O modelo de vibração senoidal das asas das abelhas através de sua sustentação vertical média permite que as abelhas voem na vertical e aumentando-se o empuxo horizontal, estas conseguem se mover na horizontal, utilizando o par de asas posteriores. E ao alternar o empuxo de cada uma das asas posteriores permite que esta realize guinadas horárias e anti-horárias. Assim, a propulsão das abelhas é baseada na combinação entre arrasto médio vertical e arrasto médio horizontal de cada uma de suas asas exteriores e posteriores, considerando-se que o arrasto médio depende da frequência de batimento. Ao se pensar em modelos MAV estes teriam que ser capazes de realizar a propulsão vertical, horizontal ou de guinada com a mesma característica física do batimento das asas das abelhas. Esta variação simples do comportamento das asas permite repensar a flexibilidade, a agilidade e a performance de aeronaves que possuam esta característica de voo.

Desta forma, se mantém a propulsão, seja ela horizontal, vertical ou de guinada. Para que se possa imitar o voo das abelhas, os MAV utilizam-se de um sistema de propulsão piezo-elétrica e enquadra a condição de voo dos MAV de forma similar ao das abelhas. O empuxo das asas faz com que o corpo seja das abelhas ou seja dos MAV migrar para frente, para cima e em guinada.

A propulsão baseada no empuxo de batimento das asas cria nas abelhas e nos MAV uma

condição única e especial, capaz de realizar o voo na direção desejada.

É importante saber que o modelo de voo da MAV na direção desejada é consequência da missão orientada pela Base. Ou seja, a Base envia para a MAV a missão planejada e a MAV executa o voo para realizar a missão orientada pela Base.

O Modelo de Propulsão baseado nos pares de asas exteriores e posteriores é bastante eficiente quando aplicado a pequenas aeronaves ou a insetos. Já a aplicação deste modelo em aeronaves de grande porte, até hoje nunca foi usado, devido ao momento de inércia das asas ser muito grande.

Ou seja, para pequenas aeronaves ou mesmo para insetos este modelo de propulsão é eficaz e eficiente, já para o mesmo modelo em aeronaves grandes ou mesmo em animais voadores de grande porte, este modelo se torna inviável.

Não se encontra na natureza nenhuma ave de médio ou grande porte que utilize este modelo de voo e de propulsão. Somente é encontrado junto a insetos. Isto posto, o modelo é viável para MAV, mas não é viável para aeronaves de médio nem de grande porte.

Os motivos para esta inviabilidade são o momento de inércia das asas (muito grande), a vibração intensa e a fadiga sobre as articulações e torções das asas.

Já em aeronaves pequenas, o momento de inércia é pequeno e isto diminui a vibração intensa e o esforço sobre a fadiga nas asas.

A propulsão das abelhas e das MAV é bem diferente da propulsão das aeronaves de asa fixa e mesmo das aeronaves de asa rotativa. Pode-se pensar que se trata de um modelo totalmente novo e inusitado, pois se trata de batimento e torsão das asas nada igual aos modelos tradicionais de asa

fixa e asa rotativa.

O modelo das abelhas e das MAV também é bem diferente dos modelos de voo de aves e pássaros. Trata-se sim de um modelo de propulsão baseada no batimento e torsão das asas, encontramos casos similares em outros insetos.

A propulsão dos MAV pode também ser imitado aos das abelhas, onde no MAV pode vir a realizar o batimento vertical, gerando voo VTOL e voo pairado e batimento horizontal, gerando voo a frente e voo guinado.

3.4.1.3 Sensor Biomecânico

Como as asas operam com batimento durante o tempo todo de voo das abelhas, há, para uma aeronave MAV, a necessidade de se medir o batimento das asas tanto para voo vertical, quanto horizontal, para guinada e também para decolagem e pouso na vertical. Pois é a combinação do batimento médio sob uma frequência média necessária que permite que aeronaves MAV que venham a imitar o voo das abelhas atinjam um voo realizado conforme desejado e conforme missão específica a ser realizada. Os sensores biomecânicos têm que ser capazes de medir frequência de oscilação das asas, tensão mecânica ao longo das asas, deformação física das asas em movimento, velocidade de voo vertical, velocidade de voo horizontal, distância do alvo de voo, distância da origem de voo (colmeia), altura em relação ao solo, etc.

Em tese as abelhas deveriam ter sensores biológicos capazes de medir todas estas variáveis, contudo, é imprescindível que os MAV possam medir a frequência de oscilação das asas, tensão mecânica ao longo das asas, deformação física das asas em movimento, velocidade de voo vertical, velocidade de voo horizontal, distância do alvo de voo, distância da origem de voo (colmeia), altura em relação ao solo, etc.

Entretanto as MAV não armazenam estas medições, elas realizam a medição e em tempo

real e enviam em tempo real os valores das variáveis medidas para a Base e esta sim passa a gerir todo o voo realizado pelas aeronaves.

Nas abelhas, contudo, fazem a leitura das variáveis através de órgãos fisiológicos e tomam a própria decisão em relação a outras abelhas, ao próprio voo e em relação a colmeia. Ou seja, as abelhas são autônomas em relação a estratégia de voo, já as MAV não são.

Os sensores biomecânicos das abelhas são baseados em órgãos fisiológicos, tecidos, olhos e antenas que são capazes de perceber as informações que necessitam para cumprir sua missão de localização de florada e pólen.

No entanto as MAV necessitam de sensores tecnológicos e digitais que exercem a mesma função para poder realizar a medição de sua missão e planejamento.

Estes sensores tecnológicos e digitais exercem a medição das variáveis controladas em tempo real e também em tempo real as MAV enviam para a Base o valor das medições realizadas pelos sensores, sensores estes que imitam os sensores biomecânicos das abelhas.

Quanto mais rápido for o envio em tempo real para a Base, mais rápido a Base poderá comparar e analisar os valores das variáveis dos sensores e reencaminhar uma nova missão ou uma mesma missão com nova estratégia.

Ou seja, pode-se fazer a seguinte comparação com o corpo humano: Os olhos, ouvidos, narizes, boca, braços e mãos ficam na MAV e o cérebro fica na Base. Ou seja, a MAV é o sensor-motor e a Base é o cérebro-inteligência do Sistema.

É importante também implementar um back-up do cérebro (ou seja, back-up da Base), para que ele possa guardar com segurança o banco de dados das variáveis sem que haja risco de se perder as variáveis.

Um backup da Base é relativamente simples de executar, basta construir um

computador cluster em paralelo, que tenha a mesma capacidade de processamento, memória e disco.

Quanto a um backup das aeronaves MAV, não se torna necessário criar uma duplicidade para cada uma das MAV, basta que caso ocorra um dano em uma MAV, outra MAV que esteja próxima pode assumir a missão da aeronave danificada.

Ou seja, o próprio enxame de aeronaves opera com capacidade extra suficiente para substituir uma eventual perda de uma aeronave que esteja em missão por uma outra aeronave que esteja ociosa.

Assim, com esta duplicidade na Base e ociosidade disponível nas MAV o sistema de monitorização que emitem as abelhas se torna bastante seguro, para que não haja danos técnicos durante a operação.

3.4.1.4 Equilíbrio

O modelo matemático necessário para se medir e alcançar equilíbrio deve ser implementado nas aeronaves MAV, pois sem o mesmo, não se pode garantir eficácia na missão. O equilíbrio de voo atingido pelas abelhas é baseado na diferença de batimento de cada uma das asas e também de sua rotação, pois se a asa da direita bater mais que a asa da esquerda, a abelha gira em torno de seu eixo longitudinal e perde equilíbrio, já se a abelha realizar batimento com a asa da esquerda operar mais que a da direita, esta gira em torno do seu eixo longitudinal na rotação oposta. Além disso, a abelha precisa manter seu equilíbrio no eixo lateral e ao aumentar o batimento das 2 asas posteriores para trás, a abelha cria uma inclinação para frente, enquanto que se este batimento for menor, a abelha cria uma inclinação para trás. Ou seja, o comportamento dinâmico das asas das abelhas é fundamental para se atingir o equilíbrio necessário em cada voo da mesma. Um MAV que imite o comportamento de voo das abelhas precisa adotar este mesmo conceito físico, dinâmico e de controle.

Ou seja, é interessante que as aeronaves MAV também possuam um par de asas exteriores

para execução de voo VTOL e voo pairado e também devem possuir um par de asas posteriores para execução de voo a frente e voo guinado.

Desta forma a aeronave MAV consegue imitar perfeitamente o voo das abelhas e utilizando para isso, em cada par de asas exteriores e posteriores, um sistema de flexão e torsão baseada em piezo-eletricidade. Ou seja, quanto maior for a corrente elétrica que passa no sistema piezo-elétrico, maior será sua flexibilidade.

O equilíbrio da aeronave MAV se dá pelo movimento contínuo das asas da aeronave. No caso das abelhas o batimento ocorre com 190 Hz. No caso dos MAV pode-se operar com a mesma ou próxima frequência de 190 Hz. Ou seja, cada batimento opera próximo a 0,05 segundos.

A força de sustentação pode ser analisada segundo a seguinte fórmula:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot Cl, \quad e \quad V = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r$$

onde L = força de sustentação

ρ = densidade do ar

V = velocidade de batimento das asas exteriores

S = área das asas exteriores

Cl = coeficiente de sustentação

r = comprimento médio das asas exteriores

f = frequência de batimento das asas exteriores

O equilíbrio das abelhas em voo, assim como o equilíbrio das aeronaves MAV em voo, se dá devido ao batimento das asas de maneira sustentável e sincrônica. Tanto as abelhas como outros insetos realizam voo em zigue zague, desta forma elas voam para um lado e para o outro lado o

tempo todo. Este voo em zigue zague, com empuxo para direita e empuxo para a esquerda durante o tempo todo, define um movimento de equilíbrio no voo que a sustenta.

Ou seja, quanto maior for a velocidade de batimento da frequência das asas, maior será sua força de sustentação. No caso do voo das MAV isto também se manifesta, assim quanto maior a frequência de batimento, maior será a velocidade de batimento; e quanto maior for a velocidade de batimento, maior será sua força de sustentação.

O equilíbrio se manifesta quando a força de sustentação da asa esquerda é igual a força de sustentação da asa direita e deste modo ocorre um empuxo vertical para cima de forma equilibrada. Ou seja, num primeiro instante a força ocorre na asa da direita, num segundo instante a força ocorre na asa da esquerda. E uma vez direita, uma vez esquerda alternadamente gera um equilíbrio vertical e também horizontal.

3.4.1.5 Sistema de Controle

Para executar voo de subida vertical, a abelha executa o batimento das duas asas (alguns autores consideram 4 asas), de forma a realizar arrasto médio vertical para cima. Para executar o voo de descida vertical, a abelha diminui a frequência de batimento das duas asas de forma a diminuir o arrasto médio vertical para cima e executar diminuição do arrasto médio para cima em comparação ao seu peso gravitacional.

Ao se executar voo horizontal, a abelha executa parte do batimento das duas asas posteriores como batimento horizontal através do empuxo de cada uma de suas asas posteriores. Para se executar voo de guinada para sentido horário, a abelha aumenta parte de batimento horizontal da asa posterior da esquerda e diminui o batimento da asa da direita, já para executar voo de guinada para sentido anti-horário, a abelha aumenta parte do batimento horizontal da asa posterior da direita e diminui o batimento da asa posterior da esquerda.

Esta alternância de batimento permite que a abelha controle o seu voo na direção desejada, seja pra cima, em voo pairado, em voo VTOL, para frente ou mesmo em guinada. O sistema de controle do voo das abelhas é bem semelhante ao sistema de voo das aeronaves MAV, onde estas também possuem par de asas exteriores e par de asas posteriores.

Um controle digital simples que aumenta ou diminui a frequência de batimento permite que se controle totalmente o voo das aeronaves MAV. Aumentando-se a frequência de batimento das asas exteriores, faz com que a aeronave suba ou desça, aumentando ou diminuindo a força de arrasto, e ao se aumentar ou diminuir a força de arrasto das asas posteriores, faz-se com que a aeronave faça o voo a frente ou guinado.

Ou seja, o controle digital é fundamentalmente realizado em função do aumento ou diminuição da frequência de batimento e esta gerando o arrasto desejado e ou planejado.

Desta forma, o sistema de controle não necessita trabalhar com uma solução PID (Proporcional Integral e Derivativo), mas utiliza somente um aumento ou uma diminuição da frequência de batimento e conseqüentemente aumento ou diminuição do arrasto desejado.

Existe uma relação direta entre a frequência de batimento e o arrasto desejado, como segue na fórmula abaixo:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_d \quad e \quad V = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r$$

onde D = força de arrasto

ρ = densidade do ar

V = velocidade de batimento das asas posteriores

S = área das asas posteriores

C_d = coeficiente de arrasto

r = comprimento médio das asas posteriores

f = frequência de batimento das asas posteriores

Deste modo, ocorre uma relação direta entre as forças de arrasto e a frequência de batimento das asas posteriores e também em relação às forças de sustentação e a frequência de batimento das asas exteriores.

Permitindo assim, que o sistema de controle de voo seja regulado de maneira relativamente simples, criando empuxo vertical na sustentação e também criando empuxo horizontal pelo arrasto.

Quanto maior for a frequência de batimento, maior será a força de sustentação ou de arrasto gerando acelerações para frente e para cima.

3.4.1.6 Velocidade / Aceleração

O controle de aceleração e de velocidade de voo da abelha é focado no batimento horizontal de ambas as asas. Ao se realizar o ciclo de batimento, parte do batimento é responsável pela sustentação vertical (asas exteriores) e parte do batimento horizontal (asas posteriores) em ambas as asas, elas são responsáveis pelo empuxo horizontal para frente.

Quanto maior e mais duradouro for o empuxo horizontal, maior será o aumento da velocidade horizontal. Assim, mantendo-se parte do ciclo de batimento dedicado ao empuxo horizontal, maior será sua velocidade derivada da aceleração provocada pela força de empuxo.

A seguir apresenta-se o empuxo horizontal e sua velocidade e aceleração:

$$D = \frac{1}{2} \rho V_v^2 S - \frac{1}{2} \rho V^2 S c_l - \frac{1}{2} \rho V_v^2 S v c_d \quad ; \quad V = 2 \pi f r \quad ;$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = D - C dx/dt$$

onde D = força de arrasto horizontal
 ρ = densidade do ar
 V = velocidade de batimento das asas posteriores
 V_v = velocidade de batimento das asas exteriores
 S = área das asas posteriores
 S_v = área das asas exteriores
 r = comprimento médio das asas posteriores
 f = frequência de batimento das asas posteriores
 m = massa da abelha / ou do MAV
 d^2x/dt^2 = aceleração para frente
 dx/dt = velocidade para frente
 C = coeficiente de resistência da velocidade do ar

Em seguida apresenta-se a dinâmica de sistema vertical:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S + \frac{1}{2} \rho V_v^2 S_v c_l - \frac{1}{2} \rho V^2 S c_d ; \quad V = 2 \pi f r$$

;

$$m d^2z/dt^2 = L - C dz/dt$$

onde L = força de sustentação
 ρ = densidade do ar
 V = velocidade de batimento das asas exteriores
 V_v = velocidade de batimento das asas posteriores
 S = área das asas exteriores
 S_v = área das asas posteriores

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

C_l = coeficiente de sustentação

r = comprimento médio das asas exteriores

f = frequência de batimento das asas exteriores

m = massa da abelha / ou do MAV

d^2z/dt^2 = aceleração para cima

dz/dt = velocidade para cima

C = coeficiente de resistência do ar

Com estas equações constrói-se a dinâmica de sistema horizontal e vertical onde se quantifica a velocidade de voo e também a aceleração de voo horizontal e vertical. Estas equações estão descritas segundo equações diferenciais, contudo elas podem ser descritas como equações polinomiais utilizando-se da transformada de Laplace.

Através da transformada de Laplace as equações de sistema de dinâmica ficam como seguem:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_l ; \quad V = 2 \pi r f(s) ; \quad (ms^2 + Cs) Z(s) = L(s)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_d ; \quad V = 2 \pi r f(s) ; \quad (ms^2 + Cs) X(s) = D(s)$$

3.4.1.7 Velocidade do Vento

O vento é um enorme problema para as abelhas. Não somente porque à desloca no ar, mas também porque faz com que elas percam a localização da florada e da colmeia. Este problema de localização e arrasto com o vento faz com que as abelhas trabalhem de forma em constante comunicação entre si e entre outras abelhas da mesma colmeia, mas também faz com que cada abelha sinta a influência do vento através de seus pares de antenas.

A percepção do vento é verificada pelo par de antenas, mas seu controle e localização

desejados é feita pela comunicação vibracional com outras abelhas, principalmente com a abelha rainha. Veículos MAV que venham a imitar a dinâmica de voo das abelhas, também sofrem com a influência do vento, contudo pode-se utilizar recursos de localização geográfica individual como por exemplo GPS.

A utilização de GPS é fundamental para que a abelha operária e o zangão se localize no espaço e em relação a distância da colmeia. Contudo é fundamental que o GPS seja instalado não nas aeronaves MAV, mas sim na Base e através da contínua comunicação entre Base e MAV esta última consegue se localizar se próximo ou se distante e em que direção da Base.

Ou seja, o GPS é fundamental para localização da aeronave MAV no espaço, contudo este fica instalado na Base, caso contrário a exigência de memória, disco e processamento são enormes e inviabilizam a instalação destas nas aeronaves.

A velocidade do vento realiza arrasto tanto das abelhas quanto nas aeronaves MAV, proporcionalmente ao valor de intensidade de vento e proporcionalmente à área de arrasto seja de arrasto das abelhas, seja de arrasto das aeronaves MAV.

Assim, quanto menor for a aeronave MAV, menor será o seu arrasto pelo vento.

Desta forma, quanto menor forem as dimensões das aeronaves MAV, menor será sua influência de arrasto pelo vento horizontal.

A interferência do Vento deve ser acrescentada nas equações de sistema de dinâmica e podem ser simuladas através da utilização dos softwares MathLab e Simulink.

A força de arrasto horizontal do vento pode ser descrita segundo as seguintes equações:

$$DV = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (VV)^2 \cdot SA \cdot Cv \quad ; \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = D - Cx \frac{dx}{dt} - DV \cdot \cos(\text{TetaV}) \quad ;$$

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = D - C_y \frac{dy}{dt} - DV \cdot \sin(\text{TetaV}) ;$$

onde DV = força de arrasto horizontal do vento

ρ = densidade do ar

VV = velocidade do vento

SA = área de arrasto da abelha / ou do MAV

C_v = coeficiente de arrasto da superfície do vento

m = massa da abelha / ou do MAV

$\frac{d^2x}{dt^2}$ = aceleração para frente

$\frac{dx}{dt}$ = velocidade para frente

$\frac{d^2y}{dt^2}$ = aceleração para lado

$\frac{dy}{dt}$ = velocidade para lado

C_x = coeficiente de resistência do ar na direção x

C_y = coeficiente de resistência do ar na direção y

TetaV = ângulo de ataque do vento em relação ao eixo horizontal x

3.4.1.8 Giroscópios

Os giroscópios são recursos fundamentais para aeronaves feitas pelo homem. Através deles pode-se medir ângulo de ataque, ângulo de rotação, ângulo de guinada de forma a orientar o comportamento dinâmico de qualquer aeronave. As abelhas necessitam controlar a dinâmica de voo através de recursos outros como por exemplo vibração do par de antenas, vibração sônica (sonar), localização continuada da distância da colmeia, localização continuada da distância da florada, distância do solo, etc.

Os Giroscópios são estruturas rotacionais que realizam um movimento rotatório durante

todo o tempo. Operam como um peão de criança, girando sem parar e sem cair. Outro exemplo de giroscópio são as pás de um rotor de helicóptero que criam uma diferença de 90 graus entre a rotação de movimento e o sentido horário de rotação.

Os Giroscópios realizam um movimento de inclinação entre o movimento desejado e o movimento efetivo, inclinando-se na direção de 90 graus em direção a inclinação desejada.

Quanto maior for a operação do Giroscópio maior será sua capacidade de girar em direção horária ou anti-horária.

O sistema do giroscópio pode ser utilizado nas aeronaves MAV realizando um movimento circular que realiza a estabilidade de voo. No caso dos helicópteros o giroscópio é o próprio rotor principal.

No caso dos MAV o giroscópio pode ser montado como sendo a própria asa da aeronave. Ou seja, a asa utiliza-se de si própria para executar o movimento de estabilidade de giro, ou do giroscópio.

Como as MAV são muito pequenas, estas precisam utilizar de sistema giroscópios também bastante pequenos. Quanto menor for a aeronave MAV, menor terá de ser o sistema de giro do mesmo.

A rotação do giroscópio da aeronave MAV, precisa ser bastante compacta e diminuta, usando para rotação um princípio de piezo-eletricidade, capaz de executar uma rotação desejada e pequena.

Este princípio de piezo-eletricidade deve ser capaz de executar um movimento circular correspondente ao movimento piezo-elétrico que realize o giro desejado. O sistema piezo-elétrico deve ser capaz de construir um movimento circular que é executado pela giroscopia.

Quanto mais rápido for a execução do movimento piezo-elétrico, mais rápido será a

operação circular do giroscópio em questão e mais estável será sua operação de voo, seja voo VTOL, voo pairado, voo a frente, voo acima, voo guinado.

Para se construir um sistema giratório a partir de sistemas horizontais de movimento, pode-se construir um sistema piezo-elétrico na direção x e outro sistema piezo-elétrico na direção y com 90 graus de defasagem entre a direção x e a direção y.

Ou seja, valor máximo para direção x enquanto que valor nulo para a direção y. Em seguida, valor nulo para direção x e valor máximo para a direção y. Após isto valor máximo negativo na direção x e valor nulo na direção y e então valor nulo na direção x e valor negativo máximo na direção y. E assim, por diante.

Ou seja, a realização de movimento de translação alternada em direções x e y permitem a criação de um movimento circular de pequeno porte para a atuação nas aeronaves MAV. No caso das abelhas, estas realizam sua estabilidade de voo, baseada no batimento das asas exteriores e posteriores.

3.5.1.1 Eletromagnetismo

Os sensores biomecânicos das abelhas são construídos sob a forma de ondas vibracionais, sejam elas, ondas mecânicas ou mesmo ondas eletromagnéticas. As abelhas têm a capacidade de medir distância, localização e outros, através dos pares de antenas, dos três pares de patas, dos pares de asas e de seus pelos. Os sinais eletromagnéticos são fundamentais para localização espacial, temporal e de missão. Os MAV utilizam todo o seu aparato sensorial construído sob ondas e sinais eletromagnéticos.

É fundamental que as abelhas operárias consigam ler o sinal emitido pela a abelha rainha, pois somente com este sinal, as abelhas operárias conseguem se localizar no espaço em direção a colmeia.

As abelhas se comunicam através de sinais eletromagnéticos para informar para outras abelhas a localização de uma florada desejada. Ou seja, quando uma abelha operária localiza uma florada de interesse, ela emite um sinal esférico para todas as direções informando para outras abelhas operárias a localização desejada.

Como as abelhas possuem 2 antenas, estas conseguem se localizar no espaço, pois percebe a direção de onde vem o sinal desejado. Um sinal chega primeiro na primeira antena e depois de um intervalo mínimo o sinal chega na segunda antena.

Assim, com esta diferença de tempo de recebimento de sinais a abelha operária que está recebendo o sinal consegue saber a direção de origem do sinal e pode navegar nesta direção.

Se a abelha tivesse apenas uma antena, ela não conseguiria identificar a direção de origem do sinal, uma vez que o par de antenas funciona muito parecido com um par de ouvidos nos seres humanos, e permitem a localização e direção de origem de um sinal sônico.

O par de antenas também é usado para a localização da colmeia, uma vez que a abelha rainha, mantém durante todo o tempo um sinal de referência da origem da colmeia.

Assim, o eletromagnetismo é fundamental tanto para voo das abelhas quanto para o voo dos MAV. Contudo, no voo dos MAV a comunicação ocorre o tempo todo com sintonia com a Base. Principalmente pelo fato de as aeronaves MAV necessitarem do processamento digital e memória do algoritmo da Base.

A operação eletromagnética tanto nas abelhas como nos MAV seria impossível caso não houvesse o par de antenas. Uma vez que as abelhas iriam se perder e os MAV não conseguiriam se localizar no espaço físicos.

3.5.1.2 Aerodinâmica

O comportamento aerodinâmico das abelhas é muito diferente do comportamento de aeronaves de asa fixa, ou mesmo, de asa rotativa. As abelhas não operam em voo nenhum momento como asa fixa, pois tanto o voo VTOL, quanto o voo pairado, ou mesmo o voo em deslocamento é fundamentado em todo o tempo como voo com o batimento das asas.

Esse batimento opera parte do ciclo de batimento na vertical, gerando sustentação, e parte na horizontal, gerando empuxo. As aeronaves de asas rotativas também não operam com este princípio. Assim, a modelagem geométrica e geodinâmica das asas das abelhas provoca movimento vertical para cima e para baixo, horizontal para frente ou para trás, ou de guinada horário ou anti-horário.

O princípio de voo e de aerodinâmica é bastante diferente não imitando nem um voo de asa fixa, nem um voo de asa rotativa. O Modelo de voo das abelhas é baseado no batimento vertical (para cima) e horizontal (para frente) que ao executar este batimento, surge na direção contrária ao batimento ou um empuxo que exerce o voo na direção desejada.

Este modelo aerodinâmico somente é observado na natureza nos insetos. Não se observa nada similar nem nas aves, nem nas aeronaves de asas fixas, nem nas aeronaves de asas rotativas. Cabe às aeronaves MAV imitar em parte o voo das abelhas. Ou seja, as MAV devem criar um movimento aerodinâmico de voo de batimento de asas, utilizando para isso um princípio funcional de piezo-eletricidade que através da energia elétrica realiza movimento mecânico de batimento.

Este movimento de batimento das asas modifica drasticamente o princípio de voo dos MAV, pois eles devem exercer a capacidade de voo a partir não somente da estabilidade horizontal das asas, mas também da flexibilidade de seu movimento dinâmico.

Um sinal elétrico de uma senoide para uma frequência de 190 Hz exerce sobre um dispositivo piezo-elétrico o batimento mecânico dinâmica de voo. Ou seja, a senoide elétrica gera uma senoide mecânica e por si, constrói uma capacidade de voo proporcional a esta senoide mecânica proporcional a frequência de batimento. Quanto maior for a frequência, maior será a força de arrasto seja vertical ou horizontal.

Cabe ao movimento senoidal na frequência preestabelecida e deseja criar o movimento mecânico das asas de batimento, uma vez que o batimento é proporcional ao batimento piezo-elétrico das asas.

Existem outros insetos que também voam baseado no batimento das asas, no entanto, a escolha das abelhas para este tema ocorre devido a maior complexidade de voo, tanto individual quanto em enxame e em voo coletivo. O voo coletivo das abelhas exige um controle aerodinâmico enorme quando se fala de voo dos enxames, pois as abelhas realizam o voo individual e também o voo coletivo sem que ocorram colisões entre elas.

Desta forma o modelo aerodinâmico precisa ser planejado pela Base e pelas MAV e precisa ser executado de forma coletiva sem acidentes e sem choques. Quando uma abelha ou uma MAV executa um determinado movimento, este movimento precisa ser avisado para outras abelhas e para outros MAV de maneira a evitar as colisões dos enxames ou das aeronaves coletivas.

No modelo dominó, quando uma aeronave se aproxima de outra, esta percebe a aproximação através do Efeito Doppler e ao perceber esta aproximação executa o afastamento na mesma direção, mas em sentidos opostos. E ai, através do efeito dominó o enxame continua a execução de voo de forma segura.

3.5.1.3 Sistemas Estruturais

A estrutura das abelhas é construída sobre cabeça, tórax e abdome, par de antenas, 3 pares de patas e 1 par de asas (há autores que defendem 2 pares de asas – um par exterior e um par posterior, mas como cada conjunto funcional se posiciona colado, consideramos apenas 1 par de asas); A cabeça, tórax e abdome mantém a estrutura física da abelha, o par de antenas é responsável por toda a comunicação que uma determinada colmeia realiza entre suas abelhas, e o par de asas é responsável por toda a dinâmica e aerodinâmica de voo, seja voo VTOL, vertical, horizontal ou de guinada.

No caso das estruturas dos MAV, esta possui um conjunto de baterias, um sistema de rádio eletromagnético para comunicação com a Base e com outras aeronaves MAV, um sistema de visão, um sistema de transferência de informações para a Base a partir do par de antenas associado ao sinal de rádio, possui uma estrutura de pouso VTOL, possui 2 pares de asas, sendo 1 par exterior (para voo VTOL, voo pairado) e 1 par posterior (para deslocamento horizontal e de guinada).

E possui um sistema de estrutura mecânica para sustentar as asas, sustentar os sistemas piezo-elétricos, as antenas, os circuitos eletrônicos através da máquina de estados e as baterias.

Devemos lembrar que esta estrutura mecânica deve ser a menor possível. Menor em peso, menor em volume, menor em dimensões das asas. No caso das abelhas operárias elas pesam de 16 a 22 g, mede cerca de 1,6 cm, cicla a asa a 190 Hz, e no caso das abelhas rainhas o tamanho é aproximadamente 2 ou 3 vezes maior.

É interessante que as aeronaves MAV possuam medidas próximas das medidas da natureza e para isso, deve ser capaz de se voar e se manter escondida ao longo do voo executado, de maneira a esconder-se na natureza ou em qualquer tipo de voo.

3.5.1.4 Mecanismos

As asas exteriores das abelhas realizam dois movimentos: o primeiro trata-se de um movimento de batimento vertical, tanto de cima para baixo, quanto de baixo para cima. O segundo trata-se de um movimento de rotação, tanto rolamento horário, quanto rolamento anti-horário. Estes dois movimentos, quando combinados como um mecanismo de ação simultânea sincronizados, faz com que ocorra um ciclo de batimento, onde este ciclo começa com cada asa na posição alta em que se inicia o batimento vertical sem rotação.

Este batimento vertical sem rotação ao descer realiza sustentação vertical baseada em arrasto aerodinâmico máximo; quando a asa alcança um posicionamento baixo máximo, esta realiza

um movimento de rotação horário, de forma que em seguida realiza o terceiro ciclo onde ocorre o batimento vertical para cima; desta maneira realizando arrasto vertical mínimo; quando a asa atinge a altura máxima, ocorre o quarto movimento do ciclo em que a asa rotacional no sentido anti-horário e o ciclo recomeça.

Um MAV precisa de 4 servo motores para imitar este movimento: 2 para cada asa, em que o primeiro gera o batimento vertical e o segundo gera a rotação em rolamento. No entanto devido aos pequenos movimentos, não se usa servo motores e sim sistemas piezo-elétricos.

Um segundo movimento, também dividido em quatro ciclos ocorre em relação as asas posteriores onde existe um empuxo para traz das asas posteriores, um segundo movimento de rotação horário, um terceiro movimento para frente e um quarto movimento de rotação anti-horário. E deve-se também executar este ciclo através, não a partir de servo-motores, mas sim com a utilização de dispositivos piezo-elétricos.

A opção de utilizar servo-mecanismos é viável quando se fala de Aeronaves MAV de médio e grande porte. Já para aeronaves de pequeno porte como as que imitam as abelhas, não se deve utilizar servo-mecanismos, mas sim sistemas piezo-elétricos.

Os mecanismos de voo das asas dos MAV devem imitar um par de asas consideradas exteriores e um segundo par de asas consideradas posteriores. Em ambos os casos o par de asas realiza 4 movimentos cíclicos, sendo que os movimentos verticais, VTOL e pairados ocorrem com o par de asas exteriores e os movimentos horizontais e guinados ocorrem com o par de asas posteriores. Esta combinação alternada com 4 movimentos cíclicos, sejam eles para cima e para baixo, e/ou para frente e para traz, permite voo totalmente flexível para todas as direções quaisquer que sejam a missão e a estratégia de voo, planejada pela Base.

O mecanismo a ser desenvolvido para voo MAV pode ser planejado pela Base, e executado pela MAV, onde toda a inteligência de voo está construída na Base e na MAV fica somente os dispositivos de execução, frente, guinada, para cima, para baixo, pairado.

Como a MAV tem que ser extremamente pequena, fica nela, somente os equipamentos

executores de voo, e ficam na Base todas as inteligências, planejamento, controle e memória de voo.

Entre os equipamentos executores de voo, ficam as antenas responsáveis pela recepção dos sinais de execução de missão e de estratégia de voo; ficam os dispositivos de transdução dos sinais de missão para de sinais de atuação; e ficam os dispositivos eletrônicos juntamente com circuitos de movimento dos atuadores piezo-elétricos,

Com estas condições de sinais de missão, sinais de estratégia, dispositivos de tradução entre missão e atuação e sistemas de atuação as aeronaves MAV conseguem realizar 100 % da missão planejada pela Base.

Estes, portanto, somam-se o total conjunto de mecanismo de voo das aeronaves, entre eles 1 par de antenas de comunicação, 2 pares de asas (1 par exterior e 1 par posterior), dispositivos eletrônicos de tradução entre missão e execução de voo, 2 pares de dispositivos piezo-elétricos para execução do voo planejado, além do sistema de fonte de energia elétrica, baseada em baterias de íon de lítio.

Nesses mecanismos, a bateria de íon de lítio possui uma vida útil proporcional ao tamanho e capacidade das baterias e ao consumo instantâneo de corrente elétrica realizada pela tecnologia de voo, vertical, pairado e horizontal.

3.5.1.5 Articulações

Este modelo permite compreender que com 4 articulações (2 em cada asa) pode-se imitar a dinâmica de voo das abelhas, pois para cada asa: a primeira articulação realiza o batimento vertical, e a segunda articulação realiza a rotação de rolamento sobre a asa.

Assim, um MAV com 4 servos motores (2 em cada asa), pode-se construir uma aeronave que voe VTOL, vertical para cima e para baixo, horizontal para frente e para trás, e guinada horária e anti-horária.

Cada articulação é representada no Modelo MAV como um servo-motor capaz de atuar em um conjunto de ângulos específicos para imitar o voo de uma abelha, com a mesma flexibilidade, dinâmica, controle e performance.

A utilização de servo-motores somente é viável para aeronaves de médio e grande porte. No caso dos MAV que imitem abelhas, este exige que não seja utilizado servo-motores, mas sim atuadores piezo-elétricos. Isto pois, no caso de servo-motores as dimensões dos mesmos exigem dimensões de aves maiores, tais como pombos, gaviões ou águias.

Para dimensões de abelhas e de outros insetos a aplicação de servo-motores não é factível. Deve-se utilizar dispositivos baseados em piezo-eletricidade. Onde uma pequena variação de tensão elétrica, pode gerar uma variação do comprimento do dispositivo criando um movimento seja de translação seja de rotação da asa do MAV.

Ou seja, através da variação de tensão elétrica do dispositivo piezo-elétrico cria uma variação no comprimento do mesmo gerando um movimento proporcional no movimento das asas, seja das asas exteriores, seja das asas posteriores.

Com o movimento de rotação das asas posteriores, estas giram no sentido horário ou no sentido anti-horário; já com o movimento de batimento esta realiza o movimento de arrasto horizontal, criando o movimento de arrasto a frente ou de guinada. Com o movimento de rotação das asas exteriores, estas giram no sentido horário ou no sentido anti-horário; já com o movimento de batimento, esta realiza o movimento de arrasto na vertical, criando o movimento vertical VTOL ou pairado.

Além das articulações das asas, existe também as articulações das patas (3 pares) das abelhas, em que no caso do veículo MAV trata-se de 2 pares de pouso (1 par).

Cada pata possui 3 articulações imitando os mamíferos, com uma articulação a cintura, outra articulação no joelho e uma terceira no tornozelo. No caso das aeronaves MAV, não se necessita 6 articulações, mas somente um par de hastes de trem de pouso com capacidade flexível, como se fosse uma mola de apoio horizontal.

Uma vez que a MAV não é utilizada para andar nem se deslocar horizontalmente, como no caso das abelhas que utilizam os 3 pares de patas para andar. Já no caso dos equipamentos MAV não se usa os trens de pouso para deslocar-se em uma superfície, somente para apoio horizontal sem deslocamento.

Ou seja, os 3 pares de patas das abelhas possuem 3 articulações em cada pata, já o par de apoio do trem de pouso dos MAV não possui nenhuma articulação, mas sim uma haste horizontal flexível.

Nas abelhas há também mais duas articulações, uma no pescoço e outra no abdômen. Já no caso dos equipamentos MAV, não há a necessidade de ter nenhuma articulação no corpo da aeronave. Ou seja, todo o movimento da aeronave é feito pela dinâmica das asas e das articulações das mesmas.

O sistema biológico das abelhas é mais flexível que o sistema artificial das aeronaves MAV, contudo, consideramos que as articulações das asas das MAV somada à haste de pouso, seja suficiente para a execução das missões e das estratégias de busca e localização de objetos físicos e/ou químicos a serem procurados pela MAV.

3.5.1.6 Rigidez

As asas das abelhas não são totalmente rígidas; ao contrário, elas respondem com boa flexibilidade às mudanças dos ciclos de voo. Uma vez que ao se alternar batimento vertical para baixo ou para cima, com rotação de rolamento horário ou anti-horário, surgem forças dinâmicas bastante intensas: tanto, forças de inércia, quanto forças centrípetas e gravitacionais que deformam mecanicamente a geometria das asas. Estas dinamizam-se e movimentam-se de forma que a capacidade de fletir das asas deve ser presente de maneira a não romperem.

Desta forma as asas das abelhas fletem durante todo o tempo de operação de voo, pois estas três forças (inércia, centrípeta e gravitacional) se manifestam em operação durante todo o tempo de voo da abelha.

Em relação a força de inércia, esta se manifesta durante todo o tempo de voo. Em relação a força centrípeta se manifesta durante todo o arrasto e em relação a força gravitacional esta se manifesta sempre sem parar.

Estas 3 forças geram deformação flexível sobre as asas, o que faz com que asas se tornem flexíveis e obriguem às abelhas possuírem uma asa totalmente deformável e flexível.

Este conjunto de forças que agem sobre as asas das abelhas, também se manifestam sobre as asas do MAV. Ou seja, sobre o MAV também agem as forças de inércia, forças centrípetas e força gravitacional.

Sendo que sobre as asas agem a força gravitacional durante todo o tempo e agem as forças de inércia e centrípetas durante a dinâmica de batimento das asas e durante o voo.

Quanto maior for a intensidade e velocidade de batimento, maior será o valor das forças de inércia e forças centrípetas. É interessante notar que as forças de inércia e centrípetas são proporcionais a dinâmica de velocidade enquanto que as força gravitacional depende da massa da asa e da massa do corpo da abelha.

Cabe compreender que estas 3 forças agem durante todo o tempo de voo, e se manifestam de maneira complementar, pois a gravidade age para baixo, a força de inércia age para baixo e para cima e a força centrípeta age para fora radialmente,

A combinação destas 3 forças exige que as asas sejam capazes de suportar a atuação tanto para baixo, quanto para cima e também para fora.

Em relação aos MAV, estas 3 forças também operam durante todo o tempo de voo e

exige que as asas dos MAV consigam suportar a força de inércia, a força centrípeta e a força gravitacional.

E é também interessante que as asas das MAV sejam flexíveis o suficiente para aguentar a atuação combinada destas 3 forças. Um material interessante que pode ser utilizado para a construção das asas dos MAV é o policarbonato, mas também pode ser utilizado outros materiais plásticos.

É bom perceber que a asa dos MAV, assim como as asas das abelhas são extremamente finas e deformáveis de maneira a fletir quando necessário. Ou seja, quando a asa exterior desce, ela deflete para cima; quando a asa exterior sobe ela deflete para baixo; quando a asa posterior movimenta para traz, ela deflete para frente, quando a asa exterior movimenta para frente ela deflete para traz.

Ou seja, utilizando policarbonato ou outro material plástico, juntamente com sistema piezo-elétrico de deflexão, as asas dos MAV movimentam e flexibilizam para frente, para trás, para cima e para baixo durante todo o tempo de voo.

As asas são flexíveis enquanto que o corpo dos MAV é rígido. Apesar das abelhas possuírem articulação flexível entre tórax e abdómen, nos MAV isto não é necessário. Os MAV são construídos com um único corpo físico sem articulação ou flexibilidade no corpo.

3.5.1.7 Atuadores

No sistema de propulsão aerodinâmico das abelhas há o que mencionamos anteriormente como 4 articulações; para cada uma das 4 articulações mencionamos e posicionamos 4 servo-motores. Cada um destes 4 servo-motores representa 1 único atuador. No entanto, temos que ressaltar que há ainda nas abelhas 3 pares de patas que atuam como um “trem de pouso”. Assim, pode-se dizer que as abelhas possuem 10 atuadores, sendo 4 para voo e 6 para pouso.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

O sistema de 3 pares de patas das abelhas para atuar como “trem de pouso”, existe para permitir que a abelha pouse em qualquer superfície floral, ou seja, é adaptada para qualquer geometria espacial de diferentes floradas; Caso a abelha tivesse apenas 2 pares de patas, teria dificuldade para pousar em superfícies semiesféricas. Consideramos que uma aeronave MAV também deve ser capaz de pousar em qualquer superfície ou seja, deve-se utilizar sistemas semelhantes de 6 patas.

No entanto, os servo-motores são muito grandes para serem implementados em pequenas MAV, assim, ao invés de utilizar-se de servo-mecanismos os Engenheiros Biomiméticos passam a utilizar sistemas baseados em piezo-eletricidade. Pois estes últimos podem ser bem pequenos e facilmente adaptáveis para atuação de asas de batimento artificiais.

A opção de se utilizar sistemas piezo-elétricos ao invés de servo-motores é uma questão de tamanho e volume das aeronaves MAV que tentam imitar as abelhas. Se as aeronaves ao invés de tentarem imitar as abelhas, caso elas viessem a imitar por exemplo uma águia ou um falcão, estas poderiam utilizar-se de servo-motores maiores.

Assim, a utilização de piezo-eletricidade ou servo-motores é apenas uma questão de adaptação as dimensões geométricas e volumétricas das aeronaves MAV.

Então sobre as aeronaves MAV, defende-se para cada asa 2 atuadores, sendo um de batimento e outro de rotação. Como falamos de 2 pares de asas (1 exterior e 1 posterior), estas formam 8 atuadores sobre as asas e mais 2 trens de pouso sem articulação porém flexíveis para pouso em superfícies instáveis e irregulares.

Enquanto nas abelhas são encontrados 12 atuadores (sendo 4 nas asas e 6 nas patas e 2 no tórax) nas MAV são construídos apenas 10 atuadores (sendo 8 nas asas e 2 nas patas).

Estes atuadores agem durante toda a operação de voo, sendo que as articulações das asas agem em conjunto com as articulações do trem de pouso para a execução de pouso e decolagem.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Além disso as abelhas utilizam-se das articulações das patas para deslocamento sobre a florada e sobre os favos de mel. Já as aeronaves MAV não são projetadas para deslocamento horizontal em solo, apenas pouso e decolagem.

Assim, as MAV não andam, pois não possuem articulações nas patas para isso. O trem de pouso apesar de ser flexível não é projetado para executar deslocamentos em solo.

O trem de pouso é projetado somente para pousar e decolar na vertical (decolagem e pouso VTOL), mas não é construído para exercer deslocamentos andando em solo.

Então falamos nos MAV de 10 atuadores, sendo 2 em cada asa (gerando um total de 8 atuadores, pois trata-se de 4 asas: 2 posteriores e 2 exteriores) e 2 atuadores de solo (trem de pouso flexível). Não possuindo, diferentemente das abelhas, nenhum atuador de deslocamento caminhante no solo.

3.5.1.8 Adaptação

As abelhas possuem uma enorme capacidade de adaptação de voo em diferentes condições ambientais, sejam elas calor, frio, vento, chuva, verão, primavera, inverno, outono, hemisfério norte, hemisfério sul, em floresta, em mata, em jardim, região urbana, região rural, etc.

Esta enorme capacidade de adaptação de voo em diferentes cenários deve ser estudada e implementada em sistemas MAV de forma a multiplicar a capacidade de diferentes missões em voo. Quanto maior a capacidade de atuar em diferentes missões, maior será seu nível de atividade tecnológica, e maior será o seu grau de retorno de investimento.

Esta capacidade altamente flexível de voo em diferentes ambientes deve ser também implementada para diferentes condições de voo nas aeronaves MAV. Se as aeronaves MAV puderem ser adaptadas para voo em diferentes condições ambientais tais como calor, frio, vento, chuva, verão, primavera, inverno, outono, hemisfério norte, hemisfério sul, em floresta, em mata, em jardim, região urbana, região rural, etc.

A princípio não existe nenhuma restrição mecânica de voo a não ser o posicionamento dos objetos físicos que precisam ser contornados pelas aeronaves MAV sem realizar colisão. Ou seja, as aeronaves MAV devem ser capazes de contornar e não se chocar com outros objetos que possam vir a estar em seu caminho.

Para tanto, as aeronaves MAV precisam estar durante todo o tempo de voo emitindo um sinal sonoro que se choca com objetos terceiros e refletem como eco de maneira a saber se existe ou não um obstáculo físico a sua frente.

Esta capacidade de adaptação das aeronaves MAV é fundamental para que estas não se choquem com objetos e ou obstáculos físicos. É interessante que a emissão e recepção de sinais sonoros ocorram sempre com 2 emissores e 2 receptores para que a MAV consiga identificar a direção física e geométrica do obstáculo em si.

É por este motivo que os animais de grande porte tanto mamíferos, répteis, anfíbios, aves possuem 2 ouvidos, pois com 2 ouvidos é possível identificar a direção de um determinado som recebido.

No caso das MAV, as aeronaves recebem o sinal durante todo o tempo de voo e realiza a identificação através de receptores sônicos com 2 sensores. E desta forma, consegue realizar a leitura da direção do sinal sonoro.

Este sinal sonoro não precisa ser na banda audível, e pode ser controlado como um ultra-som a cima da banda audível pelos seres humanos.

Este modelo de emissão e recepção de sinal sonoro seja ele ultra-som ou na banda audível permite uma perfeita adaptação de voo para ambientes hostis e complexos, onde haja diferentes tipos de obstáculos e objetos.

Trata-se de uma solução relativamente simples, para um problema altamente complexo.

O voo através de obstáculos pode-se utilizar de sistema de GPS instalado na Base e com o contínuo monitoramento dos sinais e obstáculos pela MAV. Ou seja, a Base e a MAV operam o tempo todo de maneira contínua e simultânea para executar o voo das MAV em segurança.

Enquanto a Base executa o algoritmo complexo de voo com GPS e a MAV executa o tempo todo o monitoramento de sinais de ultra-som acústicos refletidos pelos objetos e obstáculos.

E com esta combinação de atuação de Base (para algoritmos complexos) e da MAV (para máquina de estado e algoritmos simples) estas conseguem realizar a dinâmica de voo das aeronaves de forma segura.

3.5.2.1 Conversão e Armazenagem de Energia

A Conversão e Armazenagem de Energia é um enorme problema para veículos MAV, uma vez que a capacidade de carga tanto geométrica-espacial quanto de peso é tão pequena quanto menor for o tamanho do equipamento de voo. Veículos MAV possuem pouca capacidade de carga de energia, seja ela, combustível fóssil, ou mesmo carga de pilhas elétricas.

Este talvez, seja o maior desafio tecnológico que enfrentam as aeronaves MAV. Sistemas

biológicos como o das abelhas, usam de otimização de energia de seus alimentos, que transformam a combinação de hidrocarbonetos com oxigênio do ar, gerando energia capaz de sustentar não somente o ser biológico, mas também toda a sua dinâmica de voo. Um quilo de gasolina gera 44000 KJ (quarenta e quatro mil quilos joules) de Energia; isso quer dizer que 1 grama de gasolina gera 44000 J (quarenta e quatro mil joules) de energia; Se considerarmos que um MAV que pesa em média 10 gramas, pode-se dizer que o MAV com 1 grama de gasolina consegue voar 4.400 metros em linha reta ou 2.200 metros ida e volta.

Com 44 mil Joules de gasolina (1 grama) é equivalente a bateria de íon de 3,7 Volts vezes 3,3 Ampere Hora de operação.

Para que as MAV possam realizar uma missão a contento, é necessário que a bateria de operação de voo da abelha seja capaz de executar a missão durante o tempo planejado. Quando a bateria fica sem carga, é necessário ou enviar uma nova Aeronave para completar a missão, ou fazer com que a aeronaves sem carga volte para base, onde o operador de voo deve trocar a bateria antiga por uma bateria nova com carga total.

A armazenagem de energia em baterias em solo permite que ao se trocar a carga anterior da bateria utilizada, por uma bateria nova, faz com que a missão possa continuar a contento. Portanto há duas opções: trocar a bateria usada por uma bateria nova ou trocar a aeronave em voo, por uma outra aeronave em solo com bateria carregada.

Para que não se perca parte da operação e/ou da missão é mais interessante trocar as aeronaves em voo por outras em solo antes que a bateria se extingue.

Na aviação militar, é utilizado o reabastecimento de combustível em voo. Infelizmente não é possível executar missão semelhante no voo das abelhas. É necessário trocar a MAV com pouca capacidade de voo por uma outra MAV completa de energia e trazê-la de volta para o solo, onde se irá trocar a bateria usada por uma bateria nova. E assim, permitir que esta volte para continuar a missão, quando necessário.

A bateria usada é trocada por uma bateria nova, e a aeronave MAV com a nova bateria se

torna apta par voltar a missão.

Por tanto a conversão e armazenagem de energia ocorre com a troca das aeronaves em voo e em missão e a troca de baterias usadas por baterias novas em solo, junto a Base.

As baterias usadas podem ser recarregadas antes de voltar novamente para recomençar a missão planejada.

Assim, ocorre um ciclo entre bateria em operação de voo, bateria trocada em voo por outras aeronaves, bateria em solo, bateria em recarga, bateria recarregada e bateria de volta para operação em voo.

As baterias podem ser recarregadas utilizando tomada elétrica, placas solares, turbina eólica, energia elétrica de origem hidráulica, termoelétrica ou qualquer outra fonte de energia elétrica.

É fundamental que as baterias sejam bem pequenas, devido a necessidade de dimensões e volumes o menor possível para a construção das MAV em pequenos portes. Baterias grandes prejudicam a necessidade de pequenas dimensões.

3.5.2.2 Reconhecimento de Padrões

A capacidade de reconhecer modelos e padrões semelhantes está associada a alguns modelos matemáticos de redes neurais. Contudo, criar modelos matemáticos capaz de imitar a dinâmica de neurônios dos cérebros das abelhas não é uma missão tão fácil, pois existem dificuldades técnicas para validar se determinado modelo de redes neurais está compatível com as abelhas ou não. Os reconhecimentos de padrões em insetos e principalmente nas abelhas é

fundamental para localizar determinadas floras, localizar o caminho de volta a colmeia, localizar outras floradas compatíveis, em fim. Trata-se de um sistema bastante complexo, mas que passa necessariamente pelos modelos matemáticos das redes neurais.

Devido ao fato de que os algoritmos de redes neurais serem bastante complexos e extensos, estes não são adequados para serem instalados e processados nas próprias MAV, mas sim devem ser instalados e processados na Base, pois as MAV possuem restrições de tamanhos e de processamento, já a Base pode possuir grandes e complexos processadores e memórias.

Estes grandes e complexos processadores e memórias podem e devem ser instalados na Base, contudo não devem ser instalados nas MAV, pois estas necessitam pequenos e baixos processadores e memórias.

Nas MAV devem ser instalados somente os sensores de captação de uns e zeros e estes devem ser transmitidos para a Base exatamente conforme lidos e captados.

Ou seja, na MAV não há processador nem memória para interpretação dos sinais, somente existe o circuito de leitura e envio para a Base. Todo o sistema de interpretação dos sinais deve estar operante na Base.

O processo de reconhecimento de padrões deve ser operacionalizado a partir de princípios de redes neurais que identifica os uns e zeros que percebe e reconhece informações procuradas e buscadas, como por exemplo, armas químicas, bombas, sistemas de explosão, entre outras operações buscadas pelas próprias MAV.

Isto posto, os MAV captam as informações através de uns e zeros e enviam estas informações através de sinais de rádio eletromagnético por um sistema dedicado presente na MAV e estes conjuntos de uns e zeros enviados para a Base permite realizar a identificação dos sinais e reconhecem se se trata de um equipamento perigoso ou de alto risco ou não.

O sistema de redes neurais, de identificação de padrões, opera como um sistema tradicional

de redes sem nenhum outro critério de seleção. Ou seja, trata-se de um sistema de redes neurais tradicional com operações de pesos de probabilidades e variáveis vetoriais de uns e zeros. Ou seja, ocorre um conjunto de uns e zeros com seus respectivos pesos e probabilidades que geram um resultado que identifica um sistema de risco, um sistema perigoso ou um sistema se risco.

Por tanto, este sistema de vetores de sinais de entrada juntamente com matrizes de probabilidades e vetores de sinais de resultado permitem a identificação e reconhecimento de padrões.

$$V_s = MP * V_e$$

V_e = Vetor de Uns e Zeros de Entrada, captado e enviado pela MAV para a Base

MP = Matriz de Probabilidade e Pesos para reconhecimento e identificação

V_s = Vetor de Uns e Zeros de Saída, resultante da identificação pela Base

Quanto maior for o valor de identificação da Matriz de Probabilidade, maior será a chance de se tratar de um objeto a ser procurado e identificado. E quanto maior for a variável do vetor de saída, maior será a certeza de que se trata de um sistema de alto risco e de perigo.

Cada variável do Vetor de Saída identifica cada variável do Vetor de Entrada vezes o fator de probabilidade da Matriz de Probabilidade. Ou seja, o vetor resultante de saída apresenta para cada variável de Entrada multiplicada por cada fator da matriz somada para a identificação e reconhecimento do vetor de saída e portanto identifica-se se há a probabilidade de ser o objeto procurado ou não.

3.5.2.3 Rastreamento de Objetos

Em equipamentos MAV a aplicação das redes neurais se torna fundamental quando se deseja localizar objetos específicos em uma missão específica. Objetos como drogas, armas, munições, bombas, sistemas radioativos, entre outros. A aplicação de veículos MAV para este tipo de missão é muito mais que louvável; trata-se de uma aplicação quase que mandatória. Outros tipos de robôs teriam grande dificuldade para se posicionar em solo ou mesmo em voo sem serem

notados. Os MAV conseguem responder a esta missão de maneira bastante hábil e sem a menor necessidade de ser observado por terceiros ou mesmo serem percebidos.

O princípio de rastreamento de objetos é fundamentado pela utilização de redes neurais para reconhecimento dos objetos, sejam eles: drogas, armas, munições, bombas, sistemas radioativos, ou outros.

A percepção e reconhecimento utiliza princípios de redes neurais. Estas redes neurais não ficam instalados nos MAV, mas sim na Base, isto posto, pois o algoritmo de reconhecimento de redes neurais ser extenso e pesado, não podendo, portanto, estarem instalados nas MAV que precisam ser pequenas e com baixo poder de processamento e de memória.

O princípio de rastreamento de objetos pode ser utilizado para localização de diversos materiais ao mesmo tempo, por exemplo, uma mala ou bolsa abandonada no metrô, ou numa estação de ônibus, ou mesmo num aeroporto.

Este tipo de objeto pode ser facilmente localizado por aeronaves MAV e permitem planejar rapidamente uma ação de emergência para abrir a bolsa ou a mala numa operação de resgate.

Ou seja, a MAV localiza o objeto e envia a informação para a Base. A Base faz a interpretação do objeto, utilizando redes neurais e informa a equipe humana para a execução do resgate e inativação da suposta bomba, na mala ou bolsa localizada pela MAV e interpretada pela Base.

O rastreamento de objetos em locais de grande movimentação pode significar a diferença entre a vida e a morte de diversas pessoas e transeuntes que estejam em locais de alto risco.

No caso das abelhas, estas informam outras abelhas operárias sobre a localização de floradas procuradas por todas. Assim, outras abelhas operárias podem migrar para a localização da florada e iniciam a captação de pólen e o entregam para a colmeia, onde o pólen será processado para a fabricação do mel.

Os MAV também podem informar outros MAV sobre sua localização, e desta forma, vários MAV podem fazer a leitura dos mesmos objetos a serem rastreados.

A leitura de vários MAV sobre o mesmo objeto rastreado permite aumentar a acuricidade e precisão da identificação do objeto rastreado. Ou seja, 3 ou 4 MAV que rastreiam o mesmo objeto é mais preciso e melhor identificado do que com apenas uma MAV. Ou seja, com 3 ou 4 MAV ou mesmo maior número, todos enviando sinais de redes neurais para a Base em solo, capacita a Base para aumentar a certeza e a precisão do objeto rastreado e identificado.

A identificação através de redes neurais de um objeto rastreado pode ser bem sucedida ao se utilizar a Base como centro processador do algoritmo e de identificação. Já se o número de aeronaves MAV for maior, mais preciso será o processo de reconhecimento de objeto.

E mais rapidamente a Base poderá informar o corpo de emergência humana que virá a desativar o suposto equipamento de alto risco. Através das MAV o corpo de emergência humana poderá encontrar detalhes sobre o equipamento de alto risco, de forma que a equipe humana possa planejar a execução da desativação do objeto.

Os MAV não correm nenhum risco de se aproximar ao objeto e levantar o maior número possível de informação sobre o objeto, como por exemplo tipo de explosivo, ou tipo de equipamento de radiação. Desta forma o corpo de emergência humana pode planejar e executar a ação de resgate e desativação do equipamento com segurança.

3.5.2.4 Comunicação

A capacidade de comunicação dos MAV é interessantíssima, pois estes podem ser capazes de transportar fone auditivo em tempo real, filmadora de imagens em tempo real, medidores de radiação entre outros sensores específicos. Os MAV podem se comunicar em tempo real com uma base receptora à distância e também são capazes de receber mudança de missão comunicada e mandada pela própria base receptora. Ou seja, a capacidade de comunicação dos MAV é de tal forma eficiente que permite não somente realizar uma missão específica, mas também receber

ordens para alterar a missão para uma segunda missão desejada pela Base.

Assim, através da recepção do par de antenas de sinais eletromagnéticos, a abelha pode saber onde está e em que direção está posicionada a colmeia, de forma que a abelha operária sabe em que direção deve voltar para alcançar a colmeia.

Do mesmo jeito a abelha operária informa para outras abelhas operárias a posição de floradas desejadas pelas abelhas operárias. Ou seja, através da emissão de sinais eletromagnéticos lidos pelo par de antenas as abelhas operárias conseguem se posicionar tanto em relação a localização da colmeia, quanto em relação a outras abelhas operárias.

A posição da colmeia é encontrada porque a abelha rainha se mantém emitindo sinal eletromagnético durante todo o tempo. E através deste sinal emitido pela abelha rainha a colmeia é localizada.

Ou seja, tanto a abelha rainha emite um sinal de localização da colmeia, como a abelha operária emite um sinal para a localização da florada de interesse. Este princípio de comunicação eletromagnético através de sinais emitidos pelo par de antenas faz com que as abelhas consigam se localizar no espaço por este princípio de comunicação.

É interessante que através do par de antenas ocorre uma diferença da emissão de sinais e é através desta diferença que a abelha receptora do sinal descobre a direção que deve se posicionar. Ou seja, pela diferença de tempo de recepção do sinal, a abelha receptora do sinal fica sabendo qual é a direção de onde vem o sinal. Este princípio é muito parecido com a localização sonora que nós seres humanos recebemos através de nossos ouvidos. Ou seja, pela recepção sonora de dois ouvidos, nós seres humanos sabemos qual é a direção de recepção sonora. O modelo das abelhas é semelhante, ou seja através da recepção eletromagnética de duas antenas, as abelhas sabem qual é a direção da recepção eletromagnética do sinal, seja o sinal emitido pela abelha rainha, seja o sinal emitido por outras abelhas operárias.

No caso dos MAV, isto ocorre de maneira semelhante. Ou seja, os MAV possuem um par de antenas que captam e também emitem sinais eletromagnéticos. A diferença de captação de sinais

entre a primeira antena e a segunda antena permite que a MAV saiba qual é a direção de emissão do sinal captado.

Ou seja, pela diferença de tempo em que a MAV recebe os sinais eletromagnéticos e pela distância entre as antenas, a aeronave MAV consegue saber a direção de localização da origem do sinal.

E através da diferença de atenuação do sinal entre as duas antenas, a aeronave MAV consegue saber a distância do sinal de origem. Se a atenuação for grande a distância é pequena, se a atenuação for pequena, a distância é grande. Além disso a frequência de emissão do sinal permite saber se é uma frequência emitida pela abelha rainha, ou se é uma frequência emitida por uma abelha operária.

Sabendo que a atenuação representa uma capacidade de localização da distância do sinal. Através da diferença entre o sinal recebido e o sinal conhecido como emitido, calculando a atenuação do sinal recebido em relação ao sinal emitido conhecido, consegue-se localizar a distância do sinal de origem emitida.

Comentado [V1]: iti

Desta forma, ao se conhecer a intensidade do sinal emitido, seja pela abelha rainha, quanto por uma abelha operária, e através da intensidade do sinal recebido, ao se calcular a diferença de atenuação do sinal, a abelha receptora do sinal, consegue localizar a distância de origem do sinal, e através da diferença de recepção do par de antenas, esta permite localizar a direção de origem do sinal.

Ou seja, com o conhecimento da direção e da distância do sinal qualquer abelha operária consegue localizar uma florada desejada e a posição da colmeia. Além disso, no caso do voo nupcial da abelha rainha, esta ao enviar sinal eletromagnético para os zangões, estes conseguem localizar a distância e a posição destes em relação a ela.

Com o mesmo princípio de localização de direção e atenuação da distância os zangões conseguem localizar a abelha rainha executando o voo nupcial. E após a fecundação esta constrói uma nova colmeia para produção de mel e pólen.

O Problema da Asa Flapeada (Batimento) [4]:

A modelagem de asa com batimento é bastante diferente das modelagens de asa fixa e também de asa rotativa. Trata-se de um modelo de asa baseado em um comportamento cíclico de batimento e de rotação que executam uma dinâmica sincronizada.

Ou seja, a asa da abelha realiza o movimento de batimento flapeando para cima e para baixo. Sendo que quando desce utiliza a asa total e aberta na horizontal, arrastando o mais possível de toda a área da asa. Enquanto que quando sobe a asa torce para a vertical e utiliza a asa de arrasto e movimento da área mínima.

Do mesmo jeito que a asa exterior realiza a operação de flap na vertical e na horizontal, a asa posterior realiza o movimento de flap para frente e para traz.

Assim, tanto as abelhas operárias, quanto os zangões e a abelha rainha, realizam o voo utilizando-se de pares de asas em movimento de flap e de torção.

Ou seja, torção para a horizontal e flap para baixo gera um empuxo para cima, torção para vertical e flap para cima gera um empuxo para baixo. Cujas diferenças são a área da asa para baixo e para cima.

Da mesma forma, torção para vertical e flap para traz gera um empuxo para frente, e torção para horizontal e flap para frente gera um empuxo para baixo. Cujas diferenças são a área da asa para baixo e para cima e consequente valor de coeficiente de arrasto.

A asa flapeada pode ser implementada também nos MAV, contudo a implementação deste par de asas com flap nas aeronaves MAV, passa pela adaptação de sistemas piezoelétricos, que com a variação de eletricidade cria uma alteração mecânica nas asas. Ou seja, quanto maior for o valor

da intensidade de corrente elétrica no sistema piezoelétrico, maior será a deflexão e dinâmica da asa mecânica.

Então com um simples sistema de piezoeletridade de batimento e de torção tanto nas asas exteriores, quanto nas asas posteriores o sistema de voo MAV se torna capaz de realizar o voo VTOL, o voo pairado, o voo frontal e o voo guinado.

Deve-se lembrar que o voo das abelhas opera com uma frequência de batimento de 190 Hz, que se trata de uma frequência de batimento bastante alta.

Como a:

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b C_d$$

Farr = Força de Arrasto

rho = densidade do ar

w = velocidade angular de batimento das asas

R = raio das asas

b = largura média das asas

Cd = coeficiente de arrasto

O sistema MAV que vier a trabalhar com batimento de 190 Hz deve ser capaz de suportar a dinâmica de voo nesta frequência, uma vez que este batimento pode vir a gerar fadiga tanto nas asas, quanto no corpo e na estrutura do MAV.

Os sistemas MAV podem vir a trabalhar com frequências um pouco menores e devem ter a capacidade de suportar o peso das aeronaves sem, contudo, danificar a estrutura das asas e a estrutura do corpo das aeronaves MAV.

Deve-se lembrar que toda a oscilação de frequência é manifestada, no caso das aeronaves MAV pelo sistema de piezoelectricidade, ou seja, a vibração de alta frequência opera ao longo do sistema piezoelétrico.

4.1.1 O Problema da Energia e da Escala

A Energia e a capacidade de voo de longas durações é um grande problema para as aeronaves MAV, pois com a pequena capacidade de carga de combustível, ocorre a pequena capacidade de voos de longa duração, pois a energia é diretamente proporcional a capacidade de duração dos voos. Quanto maior a distância necessária para ser percorrida, maior será a quantidade de combustível necessária, no entanto, isto também significa maior o peso a ser transportado. Aeronaves de pequena escala exigem pequena quantidade de combustível a ser transportado e conseqüentemente pequena será a capacidade de autonomia de voo. Se aumentarmos a capacidade de carga de combustível, será necessária aumentar a capacidade de transporte e desta forma maior será o tamanho da aeronave MAV.

No caso da maioria dos MAV não se utiliza combustível, mas sim utiliza-se bateria de íon de lítio. Uma bateria grande de íon de lítio tem como capacidade 8800 mAh e trabalha com 3,7 Volts. OU seja, trata-se de uma energia total de 32,56 Wh.

Considerando que uma abelha pesa algo em torno de 16 à 23 g. Ou seja, algo em torno de 0,02 kg ou 0,196 N um MAV semelhante em peso tem como capacidade de energia de 117.216 Joules o que significa uma capacidade de deslocamento vertical de 598.040 m.

Se considerarmos que o MAV tem como capacidade máxima o deslocamento de 10 m/s, um MAV com a mesma capacidade de deslocamento terá como autonomia 59.804 segundos, ou seja 996,7 minutos de voo ou 16,61 horas, o que representa uma capacidade de voo bastante

interessante.

Se considerarmos que a capacidade de voo de 8800 mAh é utilizada para baterias de íon de lítio que medem cerca de 5 cm por 1 cm de diâmetro e pesam cerca de 45 gramas, podemos pensar em utilizar baterias ainda menores com capacidade autonomia de voo menores.

Ou seja, a condição de capacidade de voo de energia e escalas geométricas pequenas é bastante interessante pois estamos falando de uma capacidade de voo relativamente adequada. Apesar do cálculo ter sido feito na vertical, se o cálculo for feito para voo horizontal o resultado será semelhante.

Ou seja, estamos falando de uma bateria que pesa 45 g, mede 5 cm de comprimento por 1 cm de diâmetro e tem como voltagem de trabalho algo em torno de 3,7 V e capacidade de energia de 8800 mAh.

Se pensarmos que a MAV tem que ser o menor possível, devemos selecionar uma bateria ainda menor, contudo uma bateria menor representa uma capacidade de autonomia também menor.

Para uma MAV que visa imitar uma abelha em dimensões e tamanho, esta MAV necessita utilizar uma bateria com autonomia o quanto menor possível. Menor em dimensão, menor em peso e consequentemente e lamentavelmente menor de autonomia.

O problema do fato que a escala de tamanho ter que ser limitado pela escala de autonomia e de energia. Quanto menor for a escala de tamanho, menor terá que ser sua bateria e consequentemente menor será sua autonomia. O fato de a MAV ser menor tem como vantagem o fato de o peso também ser menor e ter como desvantagem o fato de a autonomia também ter que ser menor.

Assim, escala e energia são diretamente proporcionais. Quanto maior for a escala maior

poderá ser sua capacidade de energia em voo e quanto menor for a escala, menor terá de ser sua capacidade de autonomia e energia em voo.

Para um MAV que deseja imitar a geometria das abelhas, este exige que as baterias sejam o menor possível, isto para que a MAV não seja reconhecida e sim emite intensamente o voo de uma abelha real, que mede algo em torno de 16 a 22 mm no caso das abelhas operárias e 2 a 3 vezes esta medida no caso de uma abelha rainha.

Baterias de relógio medem geralmente algo em torno de 5 mm de espessura e 10 mm de diâmetro. É necessário avaliar a capacidade e autonomia para a potencial utilização destas.

Ou seja, é uma equação que valida dimensões geométricas, peso, voltagem, amperagem, autonomia de operação e energia. Com estas variáveis em mãos pode-se selecionar a bateria ideal para operação nos MAV.

A variável que mais consome energia nas MAV se trata da operação de voo baseada em piezoelectricidade. É através da piezoelectricidade que a aeronave MAV consegue se sustentar em voo VTOL, em voo pairado, em voo frontal e em voo guinado.

A dinâmica de voo através da piezoelectricidade provoca o maior consumo de energia da aeronave. Outra função que consome grande energia trata-se da visão de imagens, codificação dos sinais de imagens em uns e zeros e envio destes sinais para a Base. E uma terceira função que consome grande energia é a recepção de novas missões pelas antenas. As antenas devem ser capazes de decodificar uma nova missão e passar a executá-las.

4.1.2 Potência disponível e potência requerida para voo flapeado (com batimento)

A potência disponível é proporcional ao consumo do combustível disponível na aeronave MAV por unidade de tempo. Já a potência requerida é proporcional ao peso da aeronave e à velocidade média de operação da missão. Quando comparamos a potência disponível por unidade de tempo com a potência requerida temos a autonomia em tempo da missão.

A Potência disponível em um sistema elétrico para aeronaves MAV é igual aos valores que seguem:

$$Potd = V \cdot I$$

Potd = Potência disponível para um sistema elétrico das aeronaves MAV

V = voltagem de trabalho da bateria

I = corrente de trabalho do sistema elétrico das aeronaves

Enquanto isso a Energia disponível pelo sistema elétrico das aeronaves MAV é igual aos valores que se seguem:

$$Ed = V \cdot I \cdot t$$

Ed = Energia disponível pelo sistema elétrico das aeronaves MAV

V = voltagem de trabalho da bateria

I = corrente de trabalho do sistema elétrico das aeronaves

t = tempo total de trabalho da bateria

Já a potência requerida pelo pelo sistema flapeado é verificada segundo as variáveis e equações abaixo:

$$Potr = Fv \cdot v$$

$$Fv = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot S + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (wv^2 \cdot Rv^2) / 4 \cdot Sv \cdot cl$$

$$Fv = m \cdot g$$

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

$$v = dz/dt$$

Potr = Potência requerida para voo vertical

Fv = Força requerida para voo vertical

v = velocidade de voo vertical

dz/dt = variação de altitude em função do tempo

rho = densidade do ar

w = velocidade angular para a abelha em torno de $2\pi f$, com $f = 190$ Hz

wv = velocidade angular para a abelhas em sustentação das asas posteriores

R = raio da asa

Rv = raio da asa posterior

S = área da asa

cd = coeficiente de arrasto

m = massa da MAV ou da abelha

g = aceleração da gravidade

Assim para que ocorra a paridade entre a Potência disponível e a Potência requerida, deve-se ter a seguinte equação:

$$Potd = Potr$$

$$\eta \cdot V \cdot I = \left(\frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 S + \frac{1}{2} \rho (wv^2 Rv^2) / 4 Sv \cdot cl \right) \cdot v$$

η = rendimento energético entre a Potência disponível e a Potência requerida

E para que ocorra a paridade entre a Energia disponível e a Energia requerida, deve-se ter a seguinte equação:

$$Ed = Er$$

$$\eta = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 S v + \frac{1}{2} \rho (wv^2 R v^2) / 4 S v c l \cdot v \cdot t$$

Ed = Energia disponível

Er = Energia requerida

η = rendimento energético entre a Energia disponível e a Energia requerida

Segue abaixo a energia de voo pairado, seja das abelhas seja dos MAV:

$$E_{vp} = m \cdot (g/2) \cdot (t^2)$$

onde E_{vp} = energia de voo pairado

m = massa da abelha ou massa do MAV

g = aceleração da gravidade

t = tempo de duração de voo pairado

4.1.3 Baixo Número de Reynolds e Performance do Aerofólio

Sistemas MAV, assim como o voo das abelhas, exercem um baixo Número de Reynolds o que significa que a dinâmica aérea possui baixa relação entre forças inerciais e forças viscosas, gerando baixa turbulência em voo. As asas das abelhas ao fletirem-se para exercer a dinâmica de voo, exercem uma eficaz dinâmica de performance comparáveis a aerofólios flexíveis. A combinação de baixo Número de Reynolds, baixa turbulência e eficaz performance de aerofólio tornam o modelo de voo das abelhas um sistema mais que fundamental para ser copiado e imitado com o propósito de voo de aeronaves MAV.

4.1.3.1 Coeficiente de Reynolds

O coeficiente, número ou módulo de Reynolds (abreviado como Re) é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. É utilizado, por exemplo, em projetos de tubulações industriais e asas de aviões.

O conceito foi introduzido por George Gabriel Stokes em 1851, mas o número de Reynolds tem seu nome oriundo de Osborne Reynolds, um físico e engenheiro hidráulico irlandês (1842-1912), quem primeiro popularizou seu uso em 1883.

O seu significado físico é um quociente de forças: forças de inércia ($v \cdot \rho$) por forças de viscosidade (μ/D). É expressado como sendo:

- v - velocidade média do fluido
- D - longitude característica do fluxo, o diâmetro para o fluxo no tubo
- μ - viscosidade dinâmica do fluido
- ρ - massa específica do fluido

A significância fundamental do número de Reynolds é que o mesmo permite avaliar o tipo do escoamento (a estabilidade do fluxo) e pode indicar se flui de forma laminar ou turbulenta. Para o caso de um fluxo de água num tubo cilíndrico, admite-se os valores de 2.000 e 2.400 como limites. Desta forma, para valores menores que 2.000 o fluxo será laminar, e para valores maiores que 2.400 o fluxo será turbulento. Entre estes dois valores o fluxo é considerado como transitório.

O número de Reynolds constitui a base do comportamento de sistemas reais, pelo uso de modelos físicos reduzidos.

Um exemplo comum é o túnel aerodinâmico onde se medem forças desta natureza em modelos de asas de aviões, automóveis, edificações. Pode-se dizer que dois sistemas são dinamicamente semelhantes se o número de Reynolds for o mesmo para ambos. D refere-se em geral, a qualquer dimensão do sistema, por exemplo a corda de asa de um avião, o comprimento de um navio, a altura de um edifício. Geralmente, nos túneis aerodinâmicos a semelhança mais utilizada é a de Mach. Tipicamente, por valores experimentais, costuma-se caracterizar um fluido com escoamento laminar com $Re < 2100$ e escoamento turbulento com $Re > 4000$.

4.1.3.2 Valores típicos de $\mu/(\rho \cdot v)$ em escoamentos

4.1.3.3 Fluxo laminar:

Água ~ $1,006 \cdot 10^{-6}$

Espematozoides ~ $1 \cdot 10^{(-2)}$

Fluxo de sangue no cérebro ~ $1 \cdot 10^2$

Fluxo de sangue na aorta ~ $1 \cdot 10^3$

4.1.3.4 Fluxo turbulento:

Pessoa nadando ~ $4 \cdot 10^6$

Avião ~ $1 \cdot 10^7$

Baleia azul ~ $3 \cdot 10^8$

Um grande navio (RMS Queen Elizabeth 2) ~ $5 \cdot 10^9$

4.1.3.5 Experimento de Reynolds

O experimento de Reynolds foi apresentado por Osborne Reynolds em 1883, provando que só existe Reynolds para escoamento turbulento. Neste experimento é construído um dispositivo com um tubo transparente horizontal, pelo qual água flui a partir de um reservatório onde se está inicialmente em repouso.

Por meio de uma cânula um filete de substância corante é injetada na corrente de água no tubo, o que propicia visualizar-se o escoamento através do comportamento deste filete colorido. Quando o filete escoar retilineamente pela tubulação, sem ocorrer sua mistura com a água, o escoamento é dito laminar. No caso de mistura rápida com a água, resultando na diluição do filete, o escoamento demonstra atingir o regime turbulento.

Para obter-se a redução da agitação da água no reservatório é necessário que esta permaneça em repouso por um tempo normalmente maior que uma hora, com o que se evita a formação de escoamentos secundários na tubulação transparente, que causam deformações no filete de corante que passa a assumir formas não úteis à demonstração, como rotações e translações ao longo do eixo do tubo.

4.1.4 Cinemática de Voo Flapeado (com batimento)

O voo das abelhas executa uma dinâmica cinética baseada em um ciclo de batimento. Este

ciclo de batimento pode ser dividido em 4 partes.

A primeira parte representa o arrasto de batimento da asa provocado pela descida vertical da mesma do ponto de altura máxima até o ponto de altura mínimo, em posição horizontal.

A segunda parte representa a rotação horária da asa de maneira a torcer a asa que estava na posição horizontal para uma posição vertical.

A terceira parte representa a subida da asa na posição vertical desde a altura mínima até a altura máxima, provocando um arrasto mínimo.

A quarta parte representa a rotação anti-horária da asa de maneira a destorcer a asa que estava na posição vertical para uma posição horizontal. Em seguida o ciclo recomeça. Quanto maior a frequência de batimento, maior será sua força de arrasto.

Ou seja, a dinâmica da primeira parte opera segundo a equação abaixo:

$$F_{hb} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b + \frac{1}{2} \rho (w_h^2 R_h^2) / 4 S_h c_l$$

Onde

F_{hb} = força horizontal para baixo

ρ = densidade do ar

w = velocidade angular, onde $w = 2 \pi f$

w_h = velocidade angular para trás

f = frequência de batimento; $f = 190$ Hz

R = raio da asa

R_h = raio da asa posterior

S_h = área da asa posterior

b = corda da asa

A dinâmica da segunda parte opera segundo a equação abaixo:

$$T_{ta} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b C_{dta} b r$$

Onde

T_{ta} = torção anti-horário

$b r$ = braço de torção

ρ = densidade do ar

w = velocidade angular, onde $w = 2 \pi f$

f = frequência de batimento; $f = 190$ Hz

R = raio da asa

b = corda da asa

C_{dta} = coeficiente de arrasto de dinâmica torção anti=horário

A dinâmica da terceira parte opera segundo a equação abaixo:

$$F_{vc} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b + \frac{1}{2} \rho (w_h^2 R_h^2) / 4 S_h c_l - \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 S_h c_d$$

Onde

F_{vc} = força vertical para cima

ρ = densidade do ar

w = velocidade angular, onde $w = 2 \pi f$

w_h = velocidade angular horizontal da asa posterior

R_h = raio da asa posterior

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

f = frequência de batimento; $f = 190$ Hz

R = raio da asa

b = corda da asa

S_h = área da asa posterior

$$T_h = \frac{1}{2} \rho \omega^2 R^2 / 4 R b C_{dth} br$$

Onde

T_h = torção horária

ρ = densidade do ar

br = braço de torção

ω = velocidade angular, onde $\omega = 2 \pi f$

f = frequência de batimento; $f = 190$ Hz

R = raio da asa

b = corda da asa

C_{dth} = coeficiente de arrasto de dinâmica de torção horária

Assim através deste ciclo de 4 fases de: arrasto para baixo, torção para cima, arrasto para cima e torção para baixo, as abelhas conseguem se locomover em qualquer direção utilizando a cinemática de voo flapeado.

Para o voo horizontal segue o mesmo princípio, contudo trata-se de arrasto para trás, torção para frente, arrasto para frente e torção para frente.

Este modelo observado nas abelhas, pode também ser aplicado através de piezo-eletricidade em 4 fases para aeronaves MAV. Onde se tem 4 fases na operação vertical/horizontal e mais 4 fases na operação traz/frente.

4.1.5 Frequência e Amplitude

A dinâmica de batimento da asa cujo ciclo foi apresentado no item anterior com 4 partes, possui duas grandes variáveis que são: frequência e amplitude da força. Quanto maior a frequência de batimento maior será sua força de arrasto e conseqüentemente maior será sua aceleração. Este aumento ocorre com o quadrado da frequência. Em relação a amplitude quanto maior for o raio da asa na segunda e na quarta parte, maior será seu empuxo horizontal para frente ou para trás. Este raio se manifesta com o comportamento ao cubo; e com a combinação de frequência quadrado e amplitude ao cubo alteram a velocidade e a aceleração das abelhas em relação à dinâmica de voo.

Assim, a frequência de batimento das asas que operam na faixa de 190 Hz e a amplitude do raio da asa que opera na faixa de 1 a 1,5 cm para as abelhas operárias e zangões e na faixa 2 a 3 cm para a abelha rainha, tanto a força quanto a torção trabalham com o raio da asa ao cubo.

A asa tem comprimento fixo tanto para voo vertical no caso de par de asas exteriores e com comprimento também fixo para voo frontal no caso de par de asas posteriores. No entanto, a asa pode diminuir a sua área de atuação fletindo seu comprimento e, portanto, diminuindo o raio R.

Desta forma tanto a abelha, quanto a aeronave MAV pode exercer dois tipos de controle: aumentar ou diminuir a frequência de batimento (f = frequência) e ou aumentar ou diminuir o raio da área da asa (R).

Com estas duas variáveis tanto a abelha, quanto a aeronave MAV consegue alterar o empuxo vertical para voo VTOL e pairado e o empuxo horizontal para voo frontal ou guinado.

Os zangões na maior parte do tempo realizam voo pairado, enquanto que as abelhas na maior parte do tempo realizam voo guinado. Ou seja, os zangões pairam durante muito tempo, mas também realizam voo frontal e guinado; e as abelhas operárias na maior parte do tempo realizam voo guinado em zigue-zague, mas também realizam voo frontal e pairado, principalmente próximos da florada e da colmeia. A força de empuxo tanto vertical quanto horizontal é tanto maior quanto maior for a frequência e amplitude de batimento. A frequência nas aeronaves MAV pode ser controlada pela frequência do circuito elétrico que controla o sistema de voo piezo-elétrico.

Já no caso da amplitude da asa, esta pode ser controlada através da flexão do tecido e do esqueleto da asa. Ou seja, quanto maior for a extensão da asa (através da extensão do esqueleto) maior será a extensão do tecido e consequentemente maior o Raio da asa e sua amplitude. Tanto a frequência quanto a amplitude podem e devem ser controladas através de circuitos piezo-elétricos.

Assim controlando-se estas duas variáveis (frequência e amplitude do raio), controla-se a intensidade das forças vertical e horizontal e a intensidade da torção horária e anti-horária. Quanto maior for a frequência, maior será suas forças e torções; e quanto maior for a amplitude do raio, maior será suas forças e torções. E isto vale tanto para as abelhas quanto para as aeronaves MAV.

Desta forma, quanto maior for a tensão elétrica do circuito piezo-elétrico que controla o esqueleto da asa, maior será a amplitude e o raio da asa e assim, maior serão suas forças verticais e horizontais. E quanto maior for a frequência do circuito piezo-elétrico que controla o batimento da asa, maior será sua frequência e também maior serão suas forças verticais e horizontais.

Nas aeronaves MAV, pode-se estabelecer um sistema de controle em malha fechada para se controlar através da frequência de batimento e também do raio de amplitude das asas. Controlando-se estas duas variáveis, consegue-se controlar a velocidade de voo vertical (pairado e VTOL), velocidade de voo horizontal (frontal) e velocidade de guinada (horária e anti-horária),

Assim o comando de voo desejado e suas respectivas variáveis de voo são enviados a partir da Base para a aeronave MAV que deve executar o voo desejado. O sistema de controle de voo deve estar em parte na Base (algoritmo de controle, variáveis de controle, velocidade desejada) e em parte deve estar na MAV (medidores de velocidades). Ou seja, a aeronave MAV mede as velocidades vertical, horizontal e de guinada e informa através de sistema eletromagnético para a Base. Esta última calcula a diferença entre as velocidades desejadas e as velocidades medidas, amplifica seus valores recalcula as novas forças e torções verticais, horizontais e de guinadas e instantaneamente emitem os novos valores para as aeronaves MAV que recebendo estas forças, através de sistemas eletromagnéticos comportam-se de maneira a alterar seu comportamento inercial gerando novas condições de controle de velocidade. Este modelo continua sendo controlado instantaneamente durante todo o tempo de operação das aeronaves MAV enquanto estas estiverem no ar. A Base pode também definir um comportamento desejado de velocidade de forma a forçar um comportamento que se queira que seja executado por um determinado tempo de voo. Ou seja, a Base pode fazer com que a MAV tenha um comportamento de voo que se queira e que se opere durante um intervalo de

tempo planejado.

Ou seja, controlando-se as velocidades de voo horizontal e vertical, através do controle desejado e planejado pela Base, e através da retroalimentação pela localização da florada ou pela localização da colmeia, a Base pode e deve criar um algoritmo e sistema de controle através de malha fechada para se alcançar e executar o plano de voo que a Base venha a orientar para que seja realizada.

4.1.6 Máxima e mínima frequência de flap

A mínima frequência de flap é associada ao peso máximo de transporte da abelha e de sua carga de pólen. No caso de veículos MAV, a mínima frequência é associada ao seu peso total mais sua carga de sensores transportada. Em relação a máxima frequência de flap esta está associada a dois fatores: velocidade menor que mach 1 e também forças inerciais dinâmicas menores que a estrutura do veículo MAV.

Ou seja, com a mínima frequência de flap, estabelece-se a mínima força de empuxo vertical, associada a Força de Arrasto Vertical mínima. Com esta força mínima tem-se o arrasto mínimo necessário para transportar seu peso, somado a sua carga de pólen, isto no caso das abelhas.

Já no caso das aeronaves MAV a Força de Arrasto Vertical mínima está associada ao peso total de seu corpo, somado a carga transportada de sensores.

A força de arrasto mínima está associada pela equação abaixo:

$$F_{arrv} = -\frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^* b^* c_l - \frac{1}{2} \rho (w h^2 R h^2) / 4^* S h^* c_d + \frac{1}{2} \rho (w h^2 R h^2) / 4^* S h$$

Onde:

F_{arrv} = força de arrasto vertical

ρ = densidade do ar

w = velocidade angular de batimento das asas ($2\pi f$) onde f = frequência de batimento

R = raio da asa

b = corda da asa

Além disso, a frequência máxima, tanto da abelha quanto das aeronaves MAV são limitadas pela frequência máxima. Frequência esta que gera a velocidade limite de mach 1.

A frequência máxima é limitada pela condição de mach 1, porque quando se atinge tal velocidade ocorre a inversão as forças aerodinâmicas. Ou seja, wR ($2\pi fR$) precisa ser menor que 340 m/s.

Desta forma tem-se limites inferiores e limites posteriores de frequência de batimento, onde o limite inferior está associada ao peso máximo das abelhas, ou das aeronaves MAV e o limite superior está associada a velocidade mach 1.

Nestas duas condições tem-se o envelope de voo, tanto das abelhas quanto das aeronaves MAV. Estabelece-se assim as operações de voo das abelhas e das aeronaves MAV. Para que a abelha ou a aeronave MAV decole, tem que ter a frequência de batimento superior ao peso e para que a velocidade máxima de voo opere de maneira estável e controlada tem que operar com velocidade menor que mach 1.

4.1.7 Ângulo de Ataque

O ângulo de ataque das abelhas obedece ao ciclo de batimento de 4 partes ou seja, pode-se estimar que o ângulo de ataque responde a uma função senoidal de vibração ao longo do tempo. Ou seja, o ângulo de ataque vai de um valor nulo para um máximo positivo, este para um valor nulo novamente e em seguida para um valor máximo negativo e em seguida novamente para um valor inicial. Este modelo pode ser simplificado como dito anteriormente para uma função senoidal no tempo.

Ou seja, o ciclo de 4 fases opera as forças de arrasto para cima (no caso das asas externas) e forças e arrasto para frente (no caso das asas posteriores). Assim o par de asas externos cria um movimento vertical que capacita para voo pairado e voo VTOL; enquanto que o par de asas posteriores cria um movimento horizontal que capacita para voo frontal e guinado.

Ou seja, o ângulo de ataque opera segundo estas 4 fases: um ângulo inicial com valor zero que cria o movimento da asa para baixo e conseqüentemente cria um empuxo para cima. Um segundo ângulo com valor de 90 graus que cria um movimento da asa para cima com um empuxo mínimo para baixo; um terceiro ângulo com valor 0 que cria um movimento de empuxo das asas para baixo com um respectivo movimento da estrutura para cima e um quarto movimento com valor de ângulo de 90 graus que cria um movimento com empuxo mínimo para baixo.

Após este quarto movimento, inicia-se de novo o ciclo a partir do ângulo inicial com valor zero. Este ciclo de zero graus, 90 graus, zero graus, 90 graus, se mantém durante todo o voo da abelha ou mesmo da aeronave MAV.

A variação constante do ângulo de ataque gera uma forte vibração e ruído no voo, tanto das abelhas quanto das aeronaves MAV. Ou seja, os componentes de voo das aeronaves MAV devem ser capazes de suportar tal vibração, seja em relação às baterias, seja em relação aos sensores eletromagnéticos, seja em relação e estrutura física da aeronave MAV.

A dinâmica do ângulo de ataque das asas deve ser capaz de não interferir no sistema de comunicação das aeronaves MAV com a Base. Ou seja, a aeronave MAV deve possuir sistemas de amortecedores da dinâmica das asas para não atrapalhar a dinâmica de informações entre a MAV e a Base. Ou seja, os sistemas piezo-elétricos das articulações das asas devem realizar um

comportamento dinâmico nas asas, com o respectivo sistema de amortecimento da vibração na estrutura da aeronave.

O ângulo de ataque por ser dinâmico durante todo o voo, deve ser capaz de não gerar interferência na estrutura das aeronaves. Esse fluxo constante e repetido de ângulos 0, 90, 0, 90 não deve interferir em nenhuma outra dinâmica seja das antenas, seja de outros atuadores e sensores que a aeronave MAV venha a suportar.

Essa sequência de movimentos e dinâmica de ângulo de ataque provoca uma contínua fase de vibração e de ruído, que pode ser facilmente ouvido no voo pairado dos zangões. E ocorre sem sobra de dúvida também nas aeronaves MAV.

Ou seja, a dinâmica de voo das asas das abelhas é simplificada pela dinâmica de batimento de voo senoidal para cima e para baixo com a respectiva dinâmica de flutuação das asas entre os valores 0 graus, 90 graus, 0 graus, 90 graus, e constantemente repetido.

Quando se atinge a altura máxima positiva, a asa muda para 0 graus, e quando se atinge a altura máxima negativa a asa muda para 90 graus. Então sabe-se que com a asa posicionada a 0 graus, tem-se o arrasto vertical máximo para cima, e quando se tem a asa posicionada para 90 graus, tem-se o arrasto vertical mínimo para baixo.

Com o impulso máximo para cima e com o impulso mínimo para baixo tem-se uma resultante positiva para cima devido a variação da quantidade de movimento resultante para cima.

$$I_c - I_b = d(m \cdot v)$$

$$F_{arrc} \cdot dtc - F_{arrb} \cdot dtb = d(m \cdot v)$$

I_c = impulso para cima

dtc = intervalo de tempo para cima

F_{arrc} = força de arrasto para cima

I_b = impulso para baixo

F_{arrb} = força de arrasto para baixo

dtb = intervalo de tempo para baixo

$T = 1/f$

T = período de batimento

f = frequência de batimento

$d_{tc} = 3 \cdot T/8$

$d_{tb} = 3 \cdot T/8$

m = massa da aeronave

v = velocidade da aeronave

$d(m \cdot v)$ = variação da quantidade de movimento

4.1.8 Morfologia de Controle de Fluxo e Estratégia de Voo

Este modelo de dinâmica do ângulo de ataque exige que a abelha possua 2 articulações em cada asa, sendo uma articulação para dinâmica vertical (par de asas exteriores) da asa e uma segunda articulação para dinâmica horizontal (par de asas posteriores) da asa. Desta forma a asa flete para cima, para baixo e também em torção realizando um movimento fletor que aumenta e diminui o ângulo de ataque e conseqüentemente aumenta e diminui a força de arrasto na subida e na descida da asa.

A estratégia de voo parte de uma abelha no solo, que progressivamente aumenta a frequência de batimento das asas e ao atingir um valor mínimo de frequência de batimento inicia

sua decolagem VTOL. A partir deste descolamento da superfície do solo ou de plantas, ou mesmo da colmeia, esta inicia um aumento da amplitude gerando uma força de empuxo horizontal.

Quando a abelha se aproxima de sua meta de voo ela vai progressivamente diminuindo o empuxo horizontal e inicia a execução de um pouso VTOL sobre o alvo. Assim, pode-se dizer que o ciclo de batimento de asa, com a alteração da frequência e a alteração da amplitude permite executar toda a estratégia de voo das abelhas. Modelo similar pode ser adaptado aos MAV.

Ou seja, as aeronaves MAV também possuem um par de asas exteriores que realizam o voo VTOL e o voo pairado e um segundo par de asas desta vez posteriores que realizam o voo frontal e o voo guinado.

Portanto há duas morfologias nas asas das abelhas e também nas asas das aeronaves MAV que geram o controle de voo. São elas a frequência de batimento das asas, tanto exteriores quanto posteriores e também a extensão ou comprimento das asas em si.

Quanto maior for a frequência de batimento das asas exteriores, maior será seu empuxo vertical para cima; e quanto maior for o raio das asas exteriores, também maior será seu empuxo vertical para cima (VTOL ou pairado).

E quanto maior for a frequência de batimento das asas posteriores, maior será seu empuxo horizontal para frente; e quanto maior for o raio das asas posteriores, também maior será seu empuxo vertical para frente (frontal ou guinado).

Esta relação entre frequência de batimento e raio da asa estabelecem conjuntamente a morfologia de voo e seu controle de fluxo de ar; enquanto isso, a Base realiza a estratégia de voo para que a aeronave MAV desempenhe uma dinâmica de voo desejada. Qualquer que seja a modalidade de voo, pois cabe a Base executar a modelagem de voo utilizando técnicas PID (Proporcional Integral e Derivativa) e desta forma ao transmitir a dinâmica de voo para as antenas da MAV, esta passa a executar o movimento planejado pela Base.

A estratégia de voo é sempre planejada pela Base e esta pode implementá-la automaticamente segundo uma estratégia previamente elaborada ou pode ser comandada por um

usuário humano que constrói a estratégia e a insere na Base.

Assim a Morfologia de Controle de Fluxo somada a Estratégia de Voo torna tanto as abelhas quanto as aeronaves MAV capazes de executar e realizar a missão para qual elas foram planejadas.

Sem a Morfologia de Controle de Fluxo, dada pela frequência de batimento e pela extensão da asa; e sem a Estratégia de Voo da por um Modelo PID de voo não se conseguiria implementar a missão previamente planejada.

4.1.9 Redução de Arrasto e Ruído

Quanto menor a frequência e quanto menor a amplitude de batimento das asas, menor será o arrasto e o ruído gerado por este batimento. Em modelos MAV que imitem as abelhas, deve-se atentar para esta redução tanto da frequência quanto da amplitude de forma a minimizar o ruído e também economizar energia.

Assim, o arrasto é maior quanto maior for a frequência de batimento da asa e quanto maior for sua dimensão e ou raio. O arrasto também é maior quanto maior seu coeficiente de arrasto.

Assim o arrasto pode ser representado por:

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \rho (w h^2 R h^2) / 4 S h + \frac{1}{2} \rho (w h^2 R h^2) / 4 S h c_d + \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 S c_l$$

Onde

F_{arr} = força de arrasto

ρ = densidade do ar

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

$$w = 2\pi f$$

w = velocidade angular

f = frequência de batimento

R = raio da asa

b = corda média da asa

cd = coeficiente de arrasto (para cima e para baixo)

cl = coeficiente de sustentação (para trás)

Com a redução de arrasto ocorre a redução do ruído. Esta redução ocorre pela redução da frequência de batimento. O ruído é facilmente observado pelo voo dos zangões, em seu voo pairado.

Quanto maior a frequência de batimento e quanto maior o raio da asa, maior será seu arrasto e maior será seu ruído. Quanto menor for a frequência de batimento e menor for o raio da asa, menor será seu arrasto e menor será seu ruído.

No entanto existe uma frequência de batimento mínima de voo que se trata da frequência equivalente ao peso da abelha carregada com pólen e ou equivalente ao peso da aeronave MAV.

$$I_v = m \cdot g \cdot T$$

I_v = Impulso vertical

$$F_{arrc} \cdot dtc - F_{arrb} \cdot dtb = m \cdot g \cdot T$$

F_{arrc} = força de arrasto para cima

dtc = tempo de arrasto para cima

F_{arrb} = força de arrasto para baixo

dtb = tempo de arrasto para baixo

T = período de batimento

m = massa da aeronave MAV

g = aceleração da gravidade

Assim o voo com mínima força de arrasto e ruído e capaz de carregar o peso bruto da aeronave MAV se trata do voo ótimo. Desta forma consegue-se dimensionar a frequência ótima de voo para um dado raio de asa pré-estabelecido.

4.1.10 Aerodinâmica do Voo Flapeado (com batimento)

O modelo aerodinâmico de voo flapeado baseado em batimento das asas é representado por um ciclo de 4 partes. No final deste capítulo apresentamos o modelo aerodinâmico baseado por um ciclo de 8 partes que demonstram o modelo com maiores detalhes, incluindo forças de arrasto, forças inerciais, forças de sustentação e peso.

O modelo de voo flapeado pode ser representado pelo batimento de duas fases de 0 graus para arrasto vertical para baixo e mais 90 graus para arrasto vertical para cima. Pode também ser representado por 4 fases: para atuar 0 graus de arrasto para baixo, 90 graus de torção horária para cima; seguido de 90 graus de arrasto para cima seguido de torção anti-horária para zero graus.

Este modelo pode ser representado por 8 fases representados no final deste documento, onde realiza de 0 graus vertical para baixo durante 3 fases, torção horária: 1 fase, 90 graus vertical para cima durante 3 fases e mais mais 0 graus de torção anti-horária: 1 fase.

Desta forma o modelo aerodinâmico de voo flapeado pode ser representado por 2 fases, 4 fases ou 8 fases. Cada um dos 3 modelos representa com maior ou menor detalhe de empuxo.

Este modelo de voo flapeado pode ser aplicado para asas exteriores de voo vertical (VTOL e pairado) e/ou pode ser aplicado para asas posteriores de voo horizontal (frontal ou guinado).

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

A aerodinâmica de voo flapeado, somente pode ser adaptado para veículos de pequeno e micro porte, pois em aeronaves de grande porte, as forças de inércia do batimento das asas se tornam inviáveis.

Sabe-se que os helicópteros realizam um movimento de batimento das pás, mas não se torna um batimento desejado, mas sim de batimentos derivados da dinâmica de ponta de pá. Já na aerodinâmica de voo flapeado desejado só se aplica a aeronaves micro e pequenas.

Isso pode ser observado também na natureza onde os insetos incluindo as abelhas realizam o voo flapeado, já nas aves de maior porte o batimento não ocorre, com exceção do voo dos beija-flores que são aves de pequeno porte com voo muito particular de batimento com altas frequências.

Se pensarmos no voo flapeado dos insetos com batimento se a asa fosse muito grande para poder sustentar pesos maiores as asas sofreriam com as leis de inércia que fariam com que as asas entrassem em processo de fadiga, pois se trata de uma dinâmica de alta frequência e grande extensão.

A aerodinâmica de voo flapeado é consequência da frequência de batimento e do comprimento de asa, como segue:

$$F_{arrv} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b - \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 S c d + \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 S h c l$$

Onde F_{arrv} = força de arrasto vertical

ρ = densidade do ar

$$w = 2 \pi f$$

w = velocidade angular do batimento

f = frequência de batimento

R = raio de extensão da asa

b = corda média da asa

cd = coeficiente de arrasto

Pesquisas de Sistemas Biomiméticos [5]:

Sistemas Biomiméticos são sistemas físico-químicos, mecânicos e/ou eletrônicos construídos pelo homem que imitam a biologia. Toda a fisiologia animal é baseada em sistemas anatômicos que usam, esqueletos (internos e externos), tecidos (subcutâneos e cutâneos), músculos e nervos (musculares e cerebrais).

Todos os sistemas biomiméticos procuram imitar a fisiologia biônica. No caso das abelhas falamos principalmente de tecidos nervosos das asas e das estruturas físicas das mesmas. Estas estruturas são imitadas pelos sistemas eletrônicos e mecânicos dos mecanismos piezo-elétricos.

Ou seja, os circuitos eletrônicos dos sistemas piezo-elétricos dos MAV imitam os tecidos nervosos das asas das abelhas; e os sistemas e mecanismos mecânicos das asas dos MAV imitam as estruturas física das asas das abelhas.

Este conjunto mecânico e eletrônico (mecatrônico) das MAV imitam os sistemas biônicos das abelhas. Pode-se afirmar que se trata de um sistema biomecatrônico. Onde se pode afirmar que se utiliza um ou mais sistemas mecatrônicos para imitar sistemas biônicos.

Na natureza, como em diversos animais, répteis, anfíbios, mamíferos, aves e peixes observa-se esta construção de sistemas mecânicos e sistemas eletrônicos convivendo harmoniosamente com princípios biológicos de tecidos de esqueletos, músculos e tecidos bióticos de todo tipo forma e construção física e fisiológica.

Ou seja, é possível afirmar sem sombra de êxito que os animais são construídos como sistemas biomecatrônicos e qualquer sistema que venha a imitar o comportamento biótico dos mesmos, precisa sem sombra de dúvida passar por princípios de fisiologia também biomeatrônica.

Uma cadeira de engenharia que vise estudar e pesquisar sistemas biomiméticos deve sem sombra de dúvida passar pelas cadeiras de engenharia mecatrônica, para em seguida estudar as cadeiras de engenharia biomimética.

Disciplinas como anatomia, fisiologia, estrutura óssea, tecido cutâneo, tecido sanguíneo, tecido nervoso, coração entre outras, devem fazer parte obrigatória do estudo de uma hipotética cadeira de Engenharia Biomimética.

Trata-se de um conjunto de pesquisa que une e mistura cadeiras de estudo tais como as cadeiras tradicionais de Engenharia Mecatrônica com as disciplinas Básicas da cadeira de Medicina.

Somente profissionais que acumulem simultaneamente os conhecimentos de engenharia e de medicina tem condições de desenvolver e pesquisar uma nova e hipotética cadeira biomimética. Caso contrário há a necessidade de ser construir equipes de profissionais multidisciplinares, profissionais que tenham as duas visões e as duas experiências.

Não se pode pensar em uma pesquisa de sistemas biomiméticos com profissionais que dominem os princípios físicos e matemáticos, nas que não dominem as questões de anatomia e fisiologia; e da mesma forma não se pode ter uma equipe que domine questões de anatomia e fisiologia, nas conhece questões e modelos físicos e matemáticos.

Só existem duas opções: ou se monta uma equipe híbrida e multidisciplinar ou se capacita

profissionais para acumular o conhecimento conjunto de matemática, física, anatomia e fisiologia

A proposta é montar uma cadeira de Engenharia BioMecatrônica, capaz de acumular os conhecimentos das duas áreas.

No caso do voo das abelhas, pode-se constituir uma cadeira para se estudar e pesquisar o voo específico dos insetos e no caso em si, estudar o voo das abelhas operárias, dos machos zangões e da abelha rainha.

Outras cadeiras podem vir a estudar o voo das aves, o voo dos beija-flores, o voo condores, o voo das águias, o voo das borboletas, etc.

A minha sugestão para iniciar o voo dos Sistemas BioMiméticos por sistemas Mecatrônicos se sustenta pelo fato de os conjuntos de tecidos bióticos são baseados em sistemas mecânicos e sistemas eletrônicos, ou seja, uma cadeira de Engenharia BioMecatrônica poderia ser facilmente adaptada para a já existente cadeira de Engenharia Mecatrônica, acrescentando-se as disciplinas de biologia e medicina básicas.

5.1.1 Aerodinâmica

A aerodinâmica de sistemas que imitam a biologia das abelhas é fundamentada por um modelo cíclico de batimento e flexão das asas das abelhas. Batimento este que faz com que as asa subam e desçam constantemente e também realizam torçam horária e anti-horária constantemente. Esta combinação de batimento vertical com torção longitudinal da asa permite que surja uma força de arrasto média para cima, força esta que mantém as abelhas e voo pairado ou frontal, ou em guinada.

Ou seja, se dividirmos e 4 fases cíclicas, pode-se observar dois movimentos verticais e dois movimentos de torção. O primeiro movimento vertical ocorre com a asa deitada na

horizontal e ao abaixar a asa ocorre um arrasto para cima. Em seguida quando a asa estiver na altura mínima, esta realiza um movimento de torção horário. Com a asa torcida para cima posicionada na vertical, inicia-se um movimento vertical para cima e arrasto para baixo. Como a asa está posicionada na vertical e o movimento também é para cima, o arrasto do movimento para baixo é mínimo. Quando a asa atinge sua posição mais alta, esta realiza o movimento de torção anti-horária e a asa se posiciona novamente na horizontal.

Esta dinâmica pode também ser dividida em 8 fases ou mais, conforme representada no final desta tese. A aerodinâmica do voo das abelhas, ou também do voo das aeronaves MAV não se compara com a aerodinâmica do voo de aviões de asas paradas, ou de aviões de asas rotativas. Trata-se de um modelo totalmente particular, com variáveis e dinâmica totalmente individual.

Nem nas aeronaves de asa fixa, nem nas aeronaves de asa rotativa, ocorrem a dinâmica de flexibilidade de batimento das asas que ocorrem nas abelhas, nos insetos e nos MAV. O princípio de batimento e de torção das asas somente é observado nos insetos.

Este cenário não pode ser aplicado em aeronaves de grande porte, devido a inércia das asas e pás rotativas. Como a inércia é muito grande, o esforço de dinâmica de voo, também se torna muito grande e o batimento das asas seria inviável ultrapassando mach 1 entrando em fadiga com esforços vibracionais e de flexão enormes.

Como o modelo se divide em 4 fases, uma fase opera para criar o voo vertical e horizontal ativo; 2 fases operam com torção (uma horária e outra anti-horária) e a quarta fase opera para posicionar de volta a asa para poder recriar a fase de aerodinâmica ativa.

Já nas aeronaves de asa fixa e nas aeronaves tradicionais de asa rotativa, a aerodinâmica ocorre em funcionamento ativo durante 100 % do tempo da operação.

Neste nosso caso de asa com frequência de batimento o impulso vertical trabalha em 25 % de toda a aplicação. Este é mais um motivo para que seja limitado o peso dos insetos e das aeronaves MAV.

Ou seja:

$$I_v = m \cdot g \cdot T$$

I_v = Impulso vertical

$$F_{arrc} \cdot dtc \text{ (25\% do tempo)} - F_{arrb} \cdot dtb \text{ (25\% do tempo)} = m \cdot g \cdot T \text{ (100\% do tempo)}$$

F_{arrc} = força de arrasto para cima

dtc = tempo de arrasto para cima ($3 \cdot T/8$)

F_{arrb} = força de arrasto para baixo

dtb = tempo de arrasto para baixo ($3 \cdot T/8$)

T = período de batimento

m = massa da aeronave MAV

g = aceleração da gravidade

Portanto a aerodinâmica do voo das abelhas e das aeronaves MAV que venham a imitar as abelhas possui diferentes performances de dinâmica em cada momento do voo, sejam elas de voo VTOL, voo pairado, voo frontal ou voo guinado.

Desta maneira, o voo das abelhas possui uma fase vertical para baixo com posicionamento das asas na horizontal, uma segunda fase de torção horária (de 0 graus a 90 graus) uma terceira fase vertical para cima com posicionamento das asas na vertical, e uma quarta fase de torção anti-horária (de 90 graus para 0 graus).

Estes 4 movimentos ou 4 fases geram um Impulso resultante para cima maior que $m \cdot g \cdot T$, onde o voo pairado é dado pela equação a seguir;

$$F_{arrc} \cdot dtc \text{ (3} \cdot T/8 \text{ do periodo)} - F_{arrb} \cdot dtb \text{ (3/8 do periodo)} = m \cdot g \cdot T \text{ (100\% do tempo)}$$

O mesmo modelo pode ser adaptado para voo horizontal, contudo ao invés de criar o empuxo vertical, cria-se o empuxo horizontal. Como segue:

$$Farrhf \cdot dt_{hf}(3/8 \text{ do período}) - Farrht \cdot dt_{ht}(3/8 \text{ do período}) = m \cdot d^2x/dt^2(100 \% \text{ do tempo})$$

Farrhf = força de arrasto horizontal para frente

dt_{hf} = intervalo de tempo de movimento para frente

Farrht = força de arrasto horizontal para trás

dt_{ht} = intervalo de tempo de movimento para trás

m = massa do sistema

d²x/dt² = aceleração do sistema

Com estas duas equações (uma vertical e outra horizontal) pode-se controlar todo e qualquer qualidade e quantidade de movimento em todas as direções (para cima, para baixo, para frente, para trás, guinado e pairado). Ou seja, aplicando a teoria de controle nas MAV pode-se ter qualquer tipo de movimento desejado.

5.1.2 Aerodinâmica em 3-D

Quando pensamos em voo 3-D, isto significa que a abelha ou o MAV que venha a imitar a abelha em voo deve ser capaz de fazer curvas e voar em guinada. Isto ocorre porque as asas das abelhas podem exercer diferentes comportamentos cíclicos. Enquanto uma asa realiza um movimento para exercer empuxo para frente, a outra asa exerce empuxo para trás. Desta forma a abelha consegue realizar a guinada necessária e desejada de movimento.

Ou seja, com a asa posterior direita batendo para trás e a asa posterior esquerda batendo para frente, gera-se um torque no sentido anti-horário, o que faz com que a abelha ou a aeronave

MAV realize um giro anti-horário. Já se a asa posterior esquerda bate para trás e a asa posterior direita bate para frente gera-se um torque no sentido horário.

Com um torque no sentido anti-horário e ou no sentido horário, ocorre a seguinte equação dinâmica:

$$Farrhe \cdot dthe \cdot bhe - Farrhd \cdot dthd \cdot bhd = J \cdot dw$$

Onde:

Farrhe = força de arrasto horizontal esquerda

dthe = duração do tempo de arrasto horizontal esquerda

bhe = braço de torque horizontal esquerda

Farrhd = força de arrasto horizontal direita

dt hd = duração do tempo de arrasto horizontal direita

bhd = braço de torque horizontal direita

J = momento de inercia do sistema

dw = variação da velocidade de rotação do sistema (horária ou anti-horária)

Desta forma a aerodinâmica em voo 3D é capacitada não somente para o voo VTOL, voo pairado e voo frontal, mas também para o voo guinado. Grande parte do voo das abelhas é baseado em voo guinado, já nas aeronaves MAV o voo guinado só se realiza quando necessário.

É muito comum observar abelhas operárias em voo em zigue-zague, que se torna observável nos movimentos de batimento de uma asa e batimento não simultâneo de outra. Outro movimento muito comum nas abelhas zangões trata-se do voo pairado.

Ou seja, através da variação entre batimento e não batimento e/ou avanço e recuo das asas,

estas podem gerar uma rotação ou curvatura no movimento das abelhas e das aeronaves MAV.

Ou seja, tanto as abelhas quanto as aeronaves MAV conseguem exercer 100 % da dinâmica de voo em 3D. Para cima, para baixo, para frente, para trás, torção horária, torção anti-horária, ou seja, total flexibilidade para voo em 3D (em todas as direções).

Desta forma, tanto as abelhas quanto as aeronaves MAV podem executar qualquer modalidade de voo: desde pousar e decolar na vertical até voo frontal em alta velocidade e também voo guinado em alta velocidade, onde a aceleração sobre a velocidade depende diretamente da frequência de batimento ao quadrado e da extensão da asa ao cubo.

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot R \cdot b - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot S \cdot c_d + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w_h^2 \cdot R_h^2) / 4 \cdot R_h \cdot b_h \cdot c_l$$

F_{arr} = força de arrasto

ρ = densidade do ar

$w = 2 \cdot \pi \cdot f$

w = velocidade angular da asa

f = frequência de batimento da asa

R = extensão do comprimento da asa

b = corda média da asa

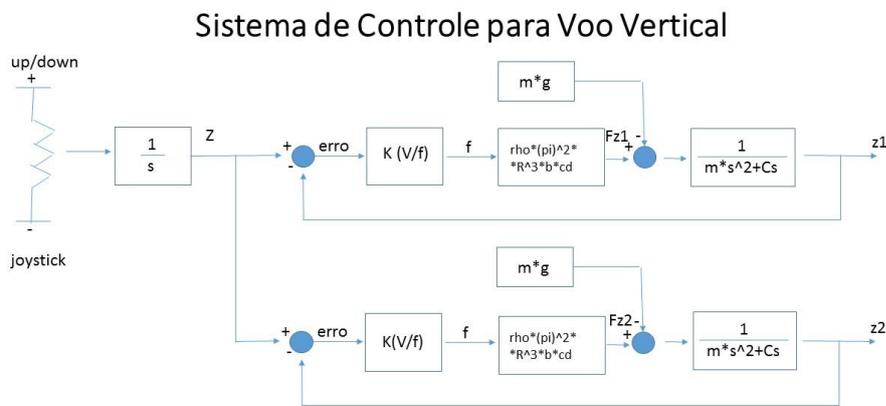
c_d = coeficiente de arrasto

5.1.3. Sensores, Atuadores e Tecnologia de Controle

A combinação de medição dos sensores que mensuram variáveis desejadas de voo dos MAV, tais como velocidade de proa, velocidade lateral, posição geográfica, altitude de voo entre outras, a ação dos atuadores como servo motores, sistemas piezoelétricos, ângulo de ataque desejado, ângulo de batimento de asa, ângulo de torção de asa e modelos de retroalimentação de controle, permite que sistemas MAV construídos pelo homem possam exercer uma dinâmica de voo

controlada e desejada.

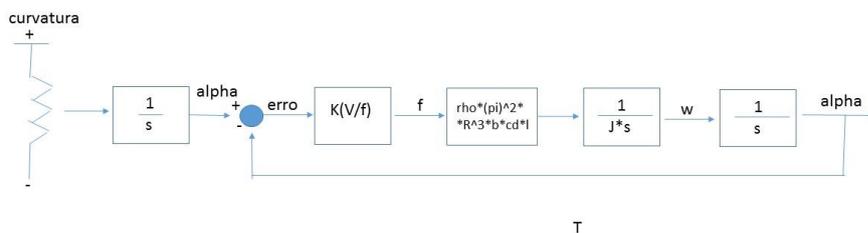
O primeiro sensor que opera nas aeronaves MAV são os sensores de altitude, onde se mede durante todo o tempo a altitude que a aeronave opera. Em um sistema de tecnologia de controle que mede a altitude real em relação a uma altitude desejada e corrige esta altitude como segue:



Sistema análogo para todos os sensores de altitude: z3, z4, z5, z6, z7, z8, z9, z10, z11, z12

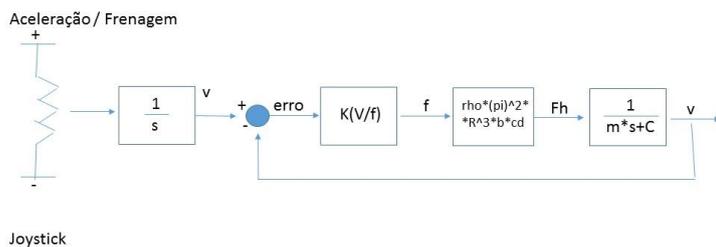
Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

Sistema de Controle de Voo Guinado horário e anti-horário



Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

Sistema de Controle de Voo de Velocidade e Frenagem



Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

Desta forma consegue-se fazer com que a aeronave MAV realize voo vertical, voo guinado, e voo frontal controlando-se a altitude, a inclinação, a guinada e a velocidade de voo frontal.

A tecnologia de controle é executada através da malha fechada onde se compara o movimento desejado em relação ao movimento medido real. E ao se controlar esta diferença, tem-se um erro de operação. Este erro é ampliado e gera-se uma nova condição de operação que aumenta ou diminui a variável de controle para o valor desejado, de forma a minimizar o erro em tempo real.

Para viabilizar esta teoria de controle, deve-se utilizar sensores. Sensores este que representam: sensor de altitude para Sistema de Controle par Voo Vertical, bussola para controle de voo guinado horário e anti-horário, sensor tubo de pitot para controle de voo de velocidade frontal e frenagem aerodinâmica e sistema de GPS para localização geográfica da aeronave MAV.

Todas as variáveis medidas pelos sensores não são armazenadas nas MAV, mas sim enviadas através de sinal eletromagnético para a Base e toda a operação estratégica é realizada na Base e o movimento desejado é enviado da Base para a aeronave MAV, que executa a operação planejada pela Base.

As equações de Força devem ser linearizadas através de sua derivada em relação à frequência e pode ser trabalhada como segue:

Equação de Força:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\pi)^2 \cdot R^3 \cdot b \cdot c_d \cdot f^2$$

Equação de Derivada da Força em relação a frequência:

$$dF/df = \rho \cdot (\pi)^2 \cdot R^3 \cdot b \cdot c_d \cdot f$$

As equações de Teoria de Controle utilizam a equação derivada da força para modelagem da equação de controle, uma vez que o modelo deve trabalhar em equação de primeira ordem ou em uma equação linear.

5.1.4. Modelagem Química e Física de alto nível

Sistemas biológicos como o das abelhas executam uma série de processos bioquímicos e físico-químicos que não são modelados de forma tradicional, mas que exigem estudos bastante profundos e que influenciam o comportamento destes bio-sistemas. A Engenharia de Sistemas Biológicos deve construir todo um modelo matemático de estudo destes sistemas bioquímicos e biofísicos. Quanto mais o homem e a ciência investir em estudar estes modelos biológicos, maior será a capacidade da ciência em compreender não somente a dinâmica de voo, mas também a dinâmica de capacitação de energia, a dinâmica hereditária, a fisiologia, a anatomia, entre outras áreas da ciência biotecnológicas.

É fundamental que uma cadeira de Sistemas Biológicos em Sistemas Bio-Mecatrônicos deve-se ter em mente que todo e qualquer modelo físico ou químico que as aeronaves MAV venham a imitar, torna-se extremamente importante que se opere em nanotecnologia uma vez que as dimensões e o peso são fatores altamente restritivos.

Assim, funções físicas e funções químicas devem ser instaladas em aeronaves MAV se e somente se estas não ocupem um grande volume nem exerça um grande peso. As funções que são instaladas nas MAV devem ser somente as funções imprescindíveis, e a grande maioria das funções e operações devem estar alocada na Base e não na MAV.

A Base não tem restrições quanto ao volume nem ao peso. E por isso todas as operações ou funções que não forem imprescindíveis de serem instaladas nas MAV devem ser instaladas na Base.

No caso das abelhas, estas desenvolvem cheiros e fragrâncias químicas que podem ser percebidas a distância quando se localiza uma florada desejada, e estas fragrâncias podem ser percebidas por outras abelhas operárias que podem vir a migrar para a direção e posição

geográfica onde há esta florada.

No caso das MAV, as aeronaves podem perceber através de cheiro, através de radiação ou de sensações medidas se há ou não bolsas com drogas, tóxicos, radiações não desejadas.

Estas percepções devem ser captadas e emanadas diretamente para a Base não mantendo a informação nas MAV, pois estas não têm grandes capacidades de memória e nem de armazenamento.

Ou seja, a MAV opera como um atravessador de informações lendo o meio ambiente e enviando as informações para a Base. Já a Base não somente armazena as informações tóxicas e críticas, mas também constrói uma nova estratégia para que a MAV possa vir a atuar.

Esta arquitetura de várias MAV e uma Base centralizadora, com seu respectivo back-up, se posiciona como uma arquitetura ideal para a MAV operar como intermediária de informações e ações e a Base se posicionar como central de informações e planejamento da execução da estratégia em ação.

Assim a modelagem física e química pode ser exercida com eficácia e eficiência pois as aeronaves MAV se posicionam diretamente não armazenando as informações, mas intermediando as informações diretamente para a Base. Estas informações são de todos os tipos, sejam de informações físicas quanto informações químicas.

Como a MAV envia estas informações físicas e químicas para a Base, estas sim pode armazenar todas as informações e tomar novas decisões de operação e movimento.

Ou seja, é a Base que estabelece as condições de modelagem física e química e define uma nova estratégia de voo e de dinâmica. Esta nova estratégia é enviada para a MAV e então a MAV exerce o novo movimento que foi planejado pela Base.

5.1.5. Acoplamento Fluídico / Estrutural / Acústico Completo

O modelo de batimento e rotação das asas das abelhas somente pode se tornar eficaz com um valor baixo de fluxo de ar que desta forma é percebida pelo baixo Número de Reynolds (baixo nível de turbulência); Além disso a asa deve possuir uma estrutura mecânica capaz de realizar a flexão vertical e longitudinal sem fratura, sem torção e sem fadiga.

Ademais, este modelo de batimento e rotação realiza um alto nível de vibração e conseqüentemente realiza um comportamento acústico bastante intenso. Um sistema MAV que venha a imitar a dinâmica de voo das abelhas, deve estar atento a estes 3 sintomas: incluindo acoplamento fluídico com a atmosfera, princípios estruturais capazes de realizar flexão e torção das asas sem ruptura nem fadiga e prevenir baixo comportamento de ruídos acústicos.

A estrutura física das asas das abelhas e também das asas das aeronaves MAV tem que ser capaz de criar um fluxo de ar para baixo e para trás que tenha condição de criar um empuxo resultante, para cima e para frente. Ou seja, o movimento das asas na vertical, no caso das asas exteriores e na horizontal no caso das asas posteriores, exige uma condição estrutural que impulsiona o fluido para baixo e para trás criando um acoplamento fluídico adequado para exercer o empuxo.

Da mesma forma o sistema de voo das abelhas e das aeronaves MAV devem ser rígidas o suficiente para acondicionar sua estrutura física que deve ser capaz de aguentar o cisalhamento nas estruturas das asas; de ser capaz de aguentar a flexão e torção do esqueleto das asas; e também aguentar a fadiga devido à grande frequência de batimento das asas.

Ou seja, tanto nos esqueletos das asas das abelhas como na estrutura física das asas das aeronaves MAV, estas devem ser capazes de suportar o cisalhamento, a flexão, a torção e a fadiga.

Os 4 cenários (cisalhamento, flexão, torção e fadiga) são obrigatórios para suporte seja nas asas das abelhas, seja nas asas das aeronaves MAV. Sendo que o cisalhamento, a flexão e a torção dependem da Força de Arrasto Vertical no caso das asas exteriores e dependem da Força de Arrasto

Horizontal no caso das asas posteriores; Estes dependem também do braço de asa no caso da flexão e torção; e dependem da frequência de batimento no caso da fadiga.

A asa das aeronaves MAV devem ser projetadas levando em consideração estes 4 cenários de cisalhamento, de flexão, torção e de fadiga. Não se pode projetar uma asa para as aeronaves MAV que não considere exigência destes 4 cenários.

É importante levar em consideração que a alta frequência de batimento, no caso 190 Hz, gera uma frequência acústica de batimento. Sabendo que a faixa de frequência acústica varia de 20 Hz a 20 KHz, ao se gerar um batimento de 190 Hz este batimento se torna uma frequência acústica audível.

Ou seja, a frequência de batimento das asas das abelhas e das asas das aeronaves MAV, caso elas operam na mesma frequência de batimento de 190 Hz, geram um sinal acústico audível (maior que lá 2: 110 Hz e menor que lá 3: 220 Hz).

Desta forma, a operação estrutural das asas das abelhas e também das asas das aeronaves MAV dependem de 3 conjuntos de características fundamentais: acoplamento fluídico em relação a dinâmica da atmosfera; condições estruturais de cisalhamento, flexão, torção e fadiga; e comportamento acústico.

O projeto de implementação de uma asa para aeronaves MAV, tem que obedecer a estes 3 conjuntos de características fundamentais. Somente calculando-se estes 3 conjuntos (acoplamento fluídico, condições de estruturas e acoplamento acústico completo) pode-se dimensionar corretamente a capacidade de voo das aeronaves MAV, para que sejam semelhantes ao comportamento dinâmico das abelhas.

Assim qualquer asa de voo de aeronave MAV deve ser projetada segundo estas 3 premissas e conjuntos. Nenhuma das 3 premissas e conjuntos pode ser desconsiderada.

5.1.6. Estruturas Inteligentes para Redução de Ruído

As asas das abelhas possuem uma estrutura de resistência à ruptura e a fadiga em que ocorrem flexão e torção das asas durante a dinâmica do ciclo de batimento e de rotação. Isto significa que a asa precisa suportar não somente a dinâmica de arrasto, mas também deve suportar a dinâmica de torção.

A combinação dos batimentos e de rotação exigem que as asas consigam suportar tanto a flexão quanto a torção e desta forma devem realizar o batimento e a rotação de maneira a reduzir o nível de ruído gerado por estes movimentos. Quanto mais preparada a estrutura das aeronaves MAV para suportar estas tendências de flexão e torção, mais efetivo se torna o nível de ruído vibracional provocado pela frequência de batimento.

Assim, para projetos realizados pelo homem, deve-se construir estruturas de asas para aeronaves MAV que sejam inteligentes o suficiente para permitir ao máximo a redução de ruído.

As asas devem ser capazes de suportar tanto a flexão, quanto o cisalhamento, quanto a torção e quanto o batimento da fadiga. A asa de um MAV tem que suportar estes 4 esforços e consequentemente a asa deve ser inteligente o suficiente para suportar a redução dos ruídos. Os ruídos das asas são fundamentalmente exercidas pela realização do batimento que opera em torno de 190 Hz.

Assim este exercício de batimento em torno de 190 Hz, gera um ruído não desejado, mas ocorre de fato. Como a frequência audível opera entre 20 Hz e 20 KHz, este batimento que opera em torno de 190 Hz opera como um sinal audível.

A possibilidade de construção de estruturas inteligentes para redução de ruído passa pela hipótese de gerar sinais acústicos que diminuam ou anulem os ruídos gerados pelo batimento das asas das aeronaves MAV.

Ou seja, pode-se criar estruturas inteligentes que gerem sinais acústicos que operem de forma a subtrair o sinal acústico gerado pelo batimento das asas. Ou seja, um sinal que opere na frequência de 190 Hz, porém com fase de 180 graus em relação a esta e mesma intensidade, de forma a anulá-la.

Através de um circuito elétrico simples, pode-se gerar um sinal acústico invertido e de mesma intensidade em relação ao batimento acústico provocado pelo batimento das asas das aeronaves MAV. Esta estrutura inteligente deve ser capaz de realizar uma leitura da frequência e da intensidade para que esta possa exercer um sinal que venha a anular o sinal acústico provocado pelo batimento das asas.

Através desta leitura inteligente consegue-se gerar um sinal acústico capaz de neutralizar o sinal acústico gerado pelas asas e pelos batimentos das mesmas. Um sinal de mesma intensidade e mesma frequência, porém com fase de 180 graus, permite anular o sinal acústico gerado por qualquer sistema, inclusive pelo batimento de um par de asas.

Trata-se de uma estrutura bastante simples e inteligente, capaz de ler um sinal e gerar outro de maneira proporcional à intensidade e de mesma frequência.

5.1.7. Capacidade de Predição de Ruído

O ruído das aeronaves MAV é realizado pela frequência de batimento e de rotação das asas que imitam as asas das abelhas. Assim, ocorre uma frequência de batimento e de rotação que, quanto maior, mais intensa será sua frequência sonora e de ruído. As frequências sonoras audíveis vibram na faixa de 20 Hz até 20 KHz; assim se as aeronaves MAV através de suas asas flexíveis vibrarem nesta faixa sonora, o ruído será inevitavelmente percebido. Evidentemente, é interessante que as aeronaves MAV realizem sua missão em silêncio para que não seja percebida por terceiros. Desta forma é interessante que a frequência de batimento e de torção que minimize a percepção de ruídos sonoros.

A maneira de se alcançar tal resultado está descrita no item anterior, onde a aeronave MAV gera um sinal acústico com intensidade e frequências iguais aos do batimento das asas, porém com

fase de 180 graus de maneira a anular o sinal acústico provocado pelo batimento das asas.

É muito importante a minimização do ruído das MAV, pois na grande maioria das missões das MAV o silêncio e o sigilo são fundamentais para o exercício e sucesso da operação. Seja qual for a missão em si.

Uma aeronave MAV que gera ruído e som, pode ser facilmente detectada e percebida e pode vir a inviabilizar o sucesso da missão. Um dos principais objetivos das MAV é exercer sua missão e sua estratégia sem que esta seja percebida. Por isso, não apenas as dimensões físicas são fundamentais, mas também a dinâmica de voo em silêncio se torna mandatório.

Portanto, é fundamental que a aeronave MAV faça voos silenciosos, sem que estes sejam percebidos por qualquer outra fonte de observação ou de atividade.

Assim, a predição de ruído, seja ele qual for, deve ser anulado por uma estrutura acústica inteligente, que realiza a leitura do ruído (intensidade e frequência) e venha a gerar um sinal oposto que possa anular este sinal anteriormente lido.

O ruído provocado pelo batimento das asas das MAV é extremamente prejudicial, pois permite que a aeronave seja localizada e o objeto observado pode se tornar objeto observador e isto pode atrapalhar a missão e a estratégia usada pela observação da MAV.

Por isso, a geração de um sinal acústico que anule o sinal acústico gerado pelo batimento das asas das aeronaves MAV é fundamental para o completo sucesso da operação, da missão e da estratégia.

Assim como a asa pode ser movimentada por um sistema piezo-elétrico que gera a dinâmica de voo e batimento das asas das aeronaves MAV, um segundo sistema piezo-elétrico pode ser usado para gerar o sinal acústico que minimize ou anule o sinal mecânico de batimento das asas.

Ou seja, utiliza-se um sinal piezo-elétrico para executar a dinâmica das asas e utiliza-se um segundo sinal piezo-elétrico para se executar a dinâmica inversa do sinal acústico. Sendo que o primeiro sinal piezo-elétrico opera na base da articulação da asa e movimenta toda a inércia da asa e o segundo sinal piezo-elétrico opera para ler e anular a dinâmica do primeiro sinal.

Utilizando-se este princípio o sistema adere a capacidade de predição de ruído e neutraliza todo e qualquer sinal acústico que venha a surgir pela operação das aeronaves MAV, trabalhando em silêncio, sem ser notada.

5.1.8. Testes baseados em fenômenos de fluxo

Quando a asa da abelha realiza batimento de cima para baixo ou de frente para trás, este movimento gera um turbilhão na periferia da asa que gera uma rotação em sua periferia e empurra a asa para baixo. Esta dinâmica de fluxo de ar em movimento de turbilhão gera um efeito indesejado, pois diminui a eficiência de batimento de asa que arrasta a abelha para um movimento vertical para cima. Assim, deve-se estudar este fenômeno para analisar a ineficácia no comportamento destas asas e propor geometrias de ponta de asa capazes de diminuir este fluxo. Testes deste modelo de fluxo são fundamentais para analisar a eficácia dos MAV.

Assim, tanto o movimento vertical de cima para baixo, quanto o movimento de torção horário, quanto o movimento vertical de baixo para cima e quanto também o movimento de torção anti-horário geram condições indesejadas de vórtices e de fluxos de ar indesejados.

Cada um destes fluxos possui características individuais e próprias. O interessante seria que através de condições aeronáuticas e ou mecânicas específicas fosse possível anular ou minimizar estes fluxos de ar e/ou estes fluxos de vórtices.

No movimento das abelhas elas utilizam a extensão das asas de forma a diminuir ou estender seu comprimento de forma a alterar a dinâmica do fluxo da asa. Não se tem certeza da eficácia desta alteração de comprimento sobre a dinâmica do fluxo de vórtices, porém este movimento merece uma carga de pesquisa e de estudo para verificar uma possível eficácia e

sucesso desta dinâmica e uma possível correção destes vórtices.

Esta hipotética diminuição dos vórtices em torno da asa, devido ao prolongamento ou encurtamento das medidas das asas das abelhas pode ter em potencial um possível sucesso na diminuição dos quesitos de fluxo de ar e de construção de vórtices.

No entanto, trata-se de uma medida de pesquisa específica para ser estudada. No caso das aeronaves MAV as asas flexíveis devem também ter a capacidade de aumento e encurtamento da extensão e também alteração da corda média da asa do MAV.

Ou seja, alterando-se a extensão e alternando-se a medida da corda média ocorre uma mudança dos fluxos de ar e conseqüentemente uma mudança dos vórtices. Contudo há a necessidade de se verificar a eficácia destas alterações e diminuições dos fluxos e dos vórtices.

Este processo em tese não ocorre somente nas abelhas, mas sim e também nas asas das aeronaves MAV, pois estas também realizam um movimento vertical de cima para baixo, seguido de um movimento de torção no sentido horário, em seguida ocorre o movimento vertical de baixo para cima e em quarto ocorre o movimento anti-horário de torção. Ou seja, tanto nas abelhas quanto nas MAV ocorre o tempo todo uma continua mudança de fluxos de ar e construção e desconstrução de vórtices, cada um com sua fase de operação.

A única possibilidade de alteração do batimento das asas e conseqüentemente de diminuição da dinâmica de fluxos de ar ocorre com a alteração das geometrias das asas, tanto em extensão quanto em tamanho da corda média e também proporcionalmente à frequência de batimento.

Assim, estamos falando de 3 variáveis que podem vir a contribuir para a criação de vórtices. São eles: extensão da asa, largura da corda média da asa e frequência de batimento da asa. É fundamental que se teste a dinâmica e a geometria das asas para checar como se pode viabilizar a diminuição das gerações de fluxos de ar indesejáveis.

Teoricamente se você aumenta a extensão da asa esta deve gerar um vórtice maior; se você aumenta a corda média da asa, ela também deve gerar um vórtice maior; e se você aumenta a

frequência de batimento ela deve mais uma vez gerar um vórtice maior. Contudo, este modelo deve ser testado e simulado em laboratório, dentro de uma janela de operação mínima e máxima tanto na extensão, quanto na corda e também na frequência de batimento. Pois a força de arrasto e dinâmica de movimento possui condições mínimas de raio da asa (incluindo a extensão), de área da asa (incluindo a extensão e a corda média) e a frequência de batimento; e estas 3 variáveis também possuem valores máximos de dinâmica de voo, que podem vir a interferir negativamente no fluxo de ar e nos vórtices gerados. Isto posto ocorre não somente nas abelhas, mas ocorrem definitivamente também nas aeronaves MAV.

5.1.9. Micro e Nano sensores e sistemas de medição

Como as aeronaves MAV são extremamente pequenas, há a necessidade de se adaptar sensores e sistemas de medição com características mínimas de espaço, tamanho e peso, de forma a se utilizar de técnicas de microeletrônica e de nanotecnologia que venham a permitir que as aeronaves MAV possam desenvolver sua missão desejada sem comprometimento de otimização ou de utilização de combustível.

Quando mencionamos combustível, não estamos nos referindo a combustíveis fósseis, mas sim estamos nos referindo a utilização de baterias elétricas de íon de lítio. Baterias pequenas são fundamentais na operação de aeronaves MAV e deve-se falar de aeronaves MAV com pequenas dimensões, pequenos pesos e um nível de autonomia capaz de exercer e executar uma missão desejada e planejada pela Base. A solução para viabilizar o sucesso de missões e estratégias, passa inexoravelmente pela microeletrônica e pela nanotecnologia.

Todos os sensores, atuadores e sistemas de comunicação com a Base e com outras aeronaves MAV devem necessariamente serem construídos com a menor condição imaginável de volume e de peso. Ou seja, os circuitos eletrônicos que mantêm os sensores, os atuadores e os sistemas de comunicação de utilizar técnicas modernas de miniaturização óptica de condições eletroeletrônicas, microeletrônicas e de nanotecnologia.

Não se pode imaginar uma aeronave MAV com dimensões próximas às dimensões das abelhas com sensores, atuadores e sistemas de comunicação pequenos, médios ou grandes. Eles

necessariamente devem ser microscópicos.

Ou seja, todos os sensores, atuadores e sistemas de comunicação devem ser construídos utilizando-se de técnicas e procedimentos semelhantes aos princípios de construção e manufatura de circuitos eletrônicos de microeletrônica e de nanotecnologia.

Somente com técnicas como estas pode-se viabilizar a dinâmica de voo de aeronaves MAV disfarçadas como biomas de abelhas reais. Qualquer técnica de construção de aeronaves MAV que não passem por estes princípios iria inviabilizar a operação de missão e de estratégia que permita que a aeronave MAV realize estas sem serem percebidas e com a correta eficácia.

Ou seja, sensores eletrônicos, atuadores eletrônicos e piezo-elétricos, sistemas de comunicação miniaturizados e a utilização de baterias de porte menor que as baterias de relógios e de maneira microscópica, devem ser capazes de se manufaturar aeronaves MAV com condições físicas, mecânicas e eletrônicas com condição de imitar os biomas das abelhas. Devemos lembrar que todo o comportamento lógico e de algoritmo funcional não opera nas MAV, mas sim na Base, onde se encontra todo o Modelo de Inteligência Sistêmica e de Operação.

Desta forma, com a Inteligência e Memória hospedados na Base, diminui-se ainda mais a necessidade de ter memória e algoritmos hospedados nas MAV e conseqüentemente permite diminuir seu volume, seu tamanho e seu peso.

5.1.10. Análise Multidisciplinar

Sistemas que são capazes de imitar a natureza exige que o time de profissionais de desenvolvimento destas tecnologias que tenham um perfil multidisciplinar, incluindo biólogos, bioquímicos, químicos, biofísicos, físicos, engenheiros mecânicos, engenheiros aeronáuticos, engenheiros eletrônicos de forma a direcionar o conhecimento e as habilidades profissionais de cada um destes perfis de maneira a otimizar o projeto, a construção e os testes; além é claro, de sua

operação efetiva.

Ter este time multidisciplinar é fundamental, pois não se pode acumular todos os conhecimentos bioquímicos, biológicos, biofísicos, mecânicos, aeronáuticos e eletrônicos em um ou dois profissionais. Além disso é fundamental montar uma capacitação que una a tecnologia mecânica e eletrônica junto com a biológica. Para isso, é necessário constituir uma cadeira de engenharia biônica, que una biologia, fisiologia e anatomia com engenharia mecatrônica e aeronáutica.

Assim é necessário e mandatário montar uma cadeira de Engenharia Multidisciplinar. Só existe duas alternativas: Ou se une uma equipe multidisciplinar ou se capacita um conjunto de profissionais para acumular o conhecimento de engenharia e de biologia, criando uma cadeira de Engenharia Biomimética (cadeira esta que acumule os conhecimentos de engenharia e de biologia).

Uma cadeira de engenharia que estude e imite o comportamento de sistemas biológicos é fundamental para se constituir uma aeronave MAV, que venha a imitar o voo das abelhas, o voo das águias, o voo dos beija-flores, o comportamento das formigas, a fidelidade dos cachorros, a intuição dos gatos, ou seja: todos os comportamentos dos animais que possam vir a ser úteis para a função de hospedagem e repetição.

A análise multidisciplinar do comportamento dos animais é muito útil, pois as técnicas e as operações fisiológicas permitem que máquinas criadas pelo homem possam vir a se comportarem repetindo as funções biológicas e biofísicas que capacitam o ser humano a imitar a dinâmica dos sistemas biomiméticos de forma a capacitar estas máquinas de maneira a permitir que o homem se torne capaz de operar estes sistemas a fornecer ao homem estes potenciais de operação.

Construir máquinas que imitem as fisiologias dos animais é muito vantajoso para o ser humano, pois o homem sozinho não consegue imitar a natureza dos animais, contudo, construindo máquinas biomiméticas o homem se capacita a repetir o comportamento dos animais, sejam eles quais forem. No nosso caso específico de estudo: imitar o voo e o comportamento coletivo das abelhas.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Imitar as abelhas, assim como imitar outros animais não deve ser exclusivamente material de cadeira de pós-graduação, mas sim deve ser disciplina de uma hipotética e futura cadeira de Engenharia Biônica.

As cadeiras de Engenharia Biônica poderiam ser divididas em 9 classes: Cadeiras de Engenharia Biônica das Bactérias, dos Vírus, das Plantas, dos Répteis, dos Anfíbios, dos Peixes, das Aves, dos Insetos e dos Mamíferos.

Este Modelo de Cadeiras de Engenharia Biônica é apenas uma sugestão e deve ser estudado e planejado com maior rigor e atenção. A proposta de trabalho de uma Cadeira de Engenharia Biônica, seria desenvolver capacidades matemáticas das cadeiras de engenharia nos dois primeiros anos e estudar condições e características biológicas nos últimos três anos do curso de engenharia.

Uma segunda opção é estudar as cadeiras multidisciplinar de biologia não em uma graduação, mas sim em uma capacitação de pós-graduação para desenvolvimento em Mestrado e Doutorado, após tido sido executada uma capacitação básica em Engenharia.

Engenharia de Sistemas [5]:

Esta equipe multidisciplinar relatada no item anterior é fundamental para o desenvolvimento de todos os diferentes sistemas de engenharia que os projetos biomiméticos exigem, incluindo todas as áreas de conhecimento de cada um dos profissionais relatados. A Engenharia de Sistemas poder-se-ia complementar se houvesse uma Engenharia de Sistemas Biofísicos, que veriam a realizar todo um cabedal de ciência e de tecnologia sobre o comportamento biológico dos animais, e neste nosso caso específico das abelhas.

Normalmente a Engenharia de Sistemas é composta por equações diferenciais que representam o movimento do Sistema em si. Estas equações diferenciais são representadas pela derivada segunda multiplicada pela massa, pela derivada primeira multiplicada pelo coeficiente de arrasto para a velocidade e do coeficiente de posição quando há a existência de molas no sistema.

Ou seja, a Engenharia de Sistemas é composto por equações diferenciais que podem ser transformadas para equações polinomiais através da transformada de Laplace. O modelo de engenharia de sistemas transformada em equações polinomiais permite a avaliação em Malha Fechada do comportamento do sistema em s .

Comentado [V2]:

O Modelo de Malha Fechada é bastante eficiente tanto para o Controle do Sistema quanto para a dinâmica do comportamento em frequência quanto para o comportamento em transferência e para controle de estabilidade.

O Modelo de Engenharia de Sistemas no caso das aeronaves MAV é bastante eficaz quando se torna de avaliar o batimento das asas exteriores quanto das asas posteriores. Esta aplicação do modelo de batimento das asas deve ser aplicada pelo comportamento em frequência. Transformando a equação diferencial em uma equação polinomial. Como segue:

$$Farr = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^b + \frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 S^c l$$

$$Farr - C \cdot dz/dt = m \cdot d^2z/dt^2$$

Segue a baixo a equação diferencial:

$$\frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^b + \frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 S^c l - \frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 S^c d - C \cdot dz/dt = m \cdot d^2z/dt^2$$

Pela transformada de Laplace, segue a equação polinomial:

$$\frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^b + \frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 S^c l - \frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 S^c d = m \cdot z \cdot s^2 + C \cdot z \cdot s$$

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

ou

$$\frac{1}{2}\rho((2\pi f)^2 R^2)/4Rb + \frac{1}{2}\rho(2\pi f_h^2 R_h^2)/4Scl - \frac{1}{2}\rho(w^2 R_h^2)/4S^2 cd = m\ddot{z} + C\dot{z}$$

Sendo:

Farr = força de arrasto vertical

ρ = densidade do ar

w = velocidade angular de batimento das asas

f = frequência de batimento das asas

f_v = frequência de batimento das asas posteriores

R = raio de extensão da asa

b = corda média da asa

cd = coeficiente de arrasto

m = massa da aeronave MAV ou massa da abelha

C = coeficiente de arrasto vertical

z = atitude

\dot{z} = velocidade de subida

\ddot{z} = aceleração de subida

s = coeficiente da equação polinomial

Com esta equação diferencial acima, é possível construir os gráficos de comportamento de frequência e também os gráficos de comportamento transitórios. E desta forma consegue-se prever o comportamento dinâmico tanto em frequência quanto em transiente.

$$Farr(s) - C(s) = ms^2$$

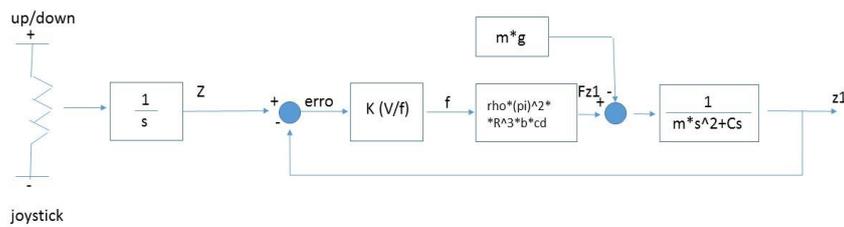
$$Farr(s) = ms^2 + Cs$$

$$F(jw) = m*(jw)^2 + C*jw$$

$$\frac{1}{2}*\rho*(w^2*R^2)/4*R*b + \frac{1}{2}*\rho*(wh^2*Rh^2)/4*S*cl = m*(jw)^2 + C*(jw)$$

Como segue no gráfico abaixo o Controle par Voo Vertical:

Sistema de Controle para Voo Vertical



Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

5.2.1. Sistemas de Informação

As abelhas possuem todo um conjunto de comunicação através de informação vibracional que realizam utilizando-se de suas antenas. Como mencionado anteriormente as abelhas se comunicam para informar e localizar a presença de florada, localizar o caminho de volta para a colmeia, colher o pólen, depositar o pólen nas células hexagonais da colmeia, etc. Já uma aeronave MAV necessita se comunicar também com sinais eletromagnéticos para receber orientação de missão da base e também para informar a base de uma situação qualquer prevista ou não. Estes

sistemas têm de ser bastante pequenos e leves, mas são de forma absolutamente necessários para a eficácia de cada missão que o MAV vier a exercer.

Assim, as aeronaves MAV, diferentemente das abelhas que se comunicam via antenas umas com a outras, comunicam-se através de sinais eletromagnéticos entre elas e entre elas e a Base. Como as aeronaves MAV não acumulam informações, estas recebem e emitem informações recebidas em tempo real e toda a informação é transmitida para Base e lá permanece armazenada.

Através da informação armazenada na Base, esta decide uma nova estratégia e emite esta nova estratégia para a aeronave MAV que passa a executá-la. Em nenhum momento ocorre a armazenagem de informações na aeronave, mas sim toda informação recebida e é imediatamente transmitida para a Base que através de diversos algoritmos toma a decisão e de inteligência artificial decide e toma a estratégia de agir e comanda as aeronaves MAV.

Assim, as aeronaves MAV atuam de forma passiva, enquanto que a Base atua de forma ativa. Isto ocorre pelo fato de que as aeronaves MAV são extremamente pequenas e não possuem condições físicas de armazenar algoritmos nem de memória. Portanto, toda armazenagem de informação, memória e de algoritmos são armazenados na Base que não possui problemas de dimensões físicas.

Desta forma, o sistema de informação das aeronaves MAV se situa em ter nas aeronaves um sistema em tempo real de recepção e transmissão de informações e na Base ocorre e se armazena todos os algoritmos de processamento e memória de informações para executar seus procedimentos necessários e definições e decisões de memória e de estratégia.

Quanto mais complexo for os algoritmos e as necessidade de memória e de estratégia, e quanto maior for o número de MAV geridos pela Base em tempo real, maior terá que ser o espaço físico e lógico de armazenagem de memória e de disco na Base.

Ou seja, quanto maior o número total de MAV administrado pela Base, maior terá de ser a capacidade da Base de gerir e controlar a quantidade total de aeronaves em tempo real. Desta

forma, duas MAV necessitam de uma capacidade de gerir pela Base de duas vezes maior que uma. Quatro MAV necessitam de uma capacidade de gerir pela Base de duas vezes maior que duas. Oito MAV necessitam de uma capacidade de gerir pela Base de duas vezes maior que quatro e assim por diante.

Os sistemas de informação tanto da Base quanto das aeronaves MAV utilizam um procedimento de radar de fornecimento e recepção de informações capazes de enviar informações em tempo real, de forma que a MAV recebe a informação (faz a leitura da informação) e imediatamente transmite esta informação para outras MAV e para a Base.

A Base recebendo esta informação realiza o processamento da mesma utilizando algoritmos diversos, toma a decisão, quanto à estratégia e emite uma informação de tomada de atitude de volta para a aeronave MAV.

Ou seja, a aeronave MAV somente recebe e envia a informação, contudo a Base recebe, processa, altera, toma a decisão e envia a informação com a nova estratégia de volta para a MAV ou para diversas MAV.

Ou seja, as aeronaves MAV são os motores e atuadores, enquanto que a Base atua como o cérebro do enxame das MAV. Quanto maior for a quantidade de MAV do enxame, maior terá de ser a capacidade de processamento da Base.

5.2.2. Sistemas Eletro-ópticos

O sistema de visão das abelhas é baseado em um par de olhos, nervos ópticos que levam o sinal eletromagnético percebido pelos olhos para o cérebro da abelha, que o interpreta através da percepção e através de reconhecimento de padrões. Sistemas MAV também necessitam de lentes de visão e de modelos matemáticos de redes neurais para interpretar e compreender os objetos observados pela aeronave em missão. A localização através de modelos de percepção e reconhecimento é fundamental para a eficácia de muita e de diferentes missões.

Sendo assim, as abelhas realizam o procedimento de reconhecimento de padrões por si só, contudo no caso das aeronaves MAV, o algoritmo de reconhecimento por redes neurais não fica nas aeronaves, mas sim fica armazenado na Base.

Desta forma, as aeronaves MAV fazem a leitura visual das informações à sua frente e à sua volta e imediatamente transmitem estas informações visuais captadas para a Base. Esta sim, faz a leitura das informações e sua interpretação através do modelo de reconhecimento de padrões construídos em função de princípios matemáticos de redes neurais.

Portanto, o sistema eletro-óptico das abelhas opera de forma completa, onde a abelha não somente captam suas informações ópticas, mas também as interpretam e tomam suas decisões de estratégia e de ações e atitudes a serem tomadas.

Já no caso das aeronaves MAV, o procedimento é diferente, pois as aeronaves somente realizam a captura dos dados e das informações visuais e estas informações são enviadas através de sinais eletromagnéticos para a Base, e esta sim realiza a interpretação através de técnicas de reconhecimento de padrões, como por exemplo: técnicas de redes neurais. E através deste reconhecimento de padrões, a Base define uma nova estratégia e a envia para uma ou mais MAV correspondentes.

Então os sistemas eletro-ópticos das abelhas é bem diferente do sistema eletro-ópticos das aeronaves MAV. Enquanto nas abelhas o sistema é distribuído para cada inseto, nas aeronaves MAV o sistema possui uma parte distribuída nas aeronaves e uma outra parte concentrada na Base.

Em relação a Base, é interessante e inclusive mandatário ter um sistema backup de operação que opere de forma online. Caso haja uma queda do sistema principal, o sistema backup assume a operação instantaneamente.

Ou seja, a Base possui um sistema backup e as aeronaves MAV possuem outras aeronaves MAV como backup de cada operação, seja ela qual for. E quem define esta estratégia em tempo real é a Base.

A utilização de dois olhos permite que a aeronave MAV assim como às abelhas, que estas adquiram uma visão em 3D (3 dimensões) e conseqüentemente permite captar uma noção de distância tanto das floradas como da colmeia, no caso das abelhas e permite localizar e controlar a distância de objetos de risco como objetos radioativos, objetos suspeitos, bombas e explosivos, no caso das aeronaves MAV.

Os sistemas de envio de sinais eletromagnéticos da aeronave MAV para a Base deve ocorrer em tempo real, para que a Base possa tomar a decisão de uma nova estratégia também em tempo real, sem que haja atrasos para a nova missão.

A nova missão definida pela Base é imediatamente comandada para a aeronave MAV específica. Ou seja, a Base não somente toma uma nova decisão estratégica como também decide qual é a aeronave MAV que vai realizar a ação planejada. E após tomar esta decisão envia a estratégia para a aeronave MAV escolhida.

Ou seja, mais uma vez: as aeronaves MAV se comportam como atuadores e operadores e a Base se comporta como o cérebro do sistema. Os MAV são os braços e a Base é a mente. Nos MAV somente se encontram processos eletrônicos de uma máquina de estado de recepção e transmissão de sinais eletrônicos e atuação pré-planejadas, enquanto que na Base encontram-se todos os algoritmos, memória, disco e banco de dados de todas as operações das diferentes MAV.

Desta forma, o sistema de inteligência do voo das abelhas é diferente do sistema de inteligência de voo das MAV. A única forma de se aproximar um sistema lógico do outro é utilizando-se de nanotecnologia. Isto posto, ocorre pelo fato de que as aeronaves MAV devem medir aproximadamente a mesma medida das abelhas operárias, em torno de 2 cm por 1 cm por 1 cm.

A aplicação de dois sensores ópticos nas aeronaves MAV é fundamental para a localização espacial em 3D (3 dimensões) das mesmas. Com apenas um sensor óptico não é possível captar as informações de distância.

Ou seja, com 2 conjuntos ópticos e de sensores ópticos tanto nas abelhas como nas aeronaves MAV consegue-se realizar a visualização em 3 dimensões e portanto consegue-se realizar a visão à distância.

5.2.3. Sistemas de Sensores e Atuadores

Como sensores das abelhas comentamos: o par de olhos, o par de antenas e os pelos de sua superfície. Como atuadores comentamos o par de asas (alguns autores defendem que são 2 pares de asas), 3 pares de patas e o ferrão no abdome. A combinação complementar dos sensores de dos atuadores permitem que as abelhas consigam: voar até a florada, colher o pólen, voar de volta até a colmeia e depositar o mesmo nas células hexagonais da colmeia. Os atuadores agem de acordo com o que os sistemas sensoriais e percebem em seu ambiente de trabalho e de vida e agem para cumprir sua missão vitalícia. Os MAV também são guiados pelos sensores sejam estes de natureza óptica, auditiva ou vibracional e exercem a dinâmica dos atuadores para cumprir sua missão, seja ela qual for.

Os MAV utilizam seus sensores ópticos vide capítulo anterior onde com um par de olhos consegue desenvolver as questões de visualização à distância em visão 3D. No caso dos MAV não ocorre a armazenagem das informações visuais, mas sim estas são captadas e enviadas diretamente para a Base através de sinal eletromagnético, e na Base estas informações são decodificadas e decisões são tomadas e enviadas de volta para a aeronave MAV que passa a exercer sua atividade planejada pela Base.

Da mesma forma que ocorre com os pares de olhos das aeronaves MAV, ocorre a captação de sinais auditivos que também são enviados para a Base através de sinal eletromagnético, e na Base as decisões são tomadas e planejadas e através das decisões planejadas, sinais eletromagnéticos são enviados de retorno para a MAV que através de seus atuadores realizam a missão desejada.

Sensores táteis também podem ser utilizados pelas aeronaves MAV, através sistemas de contato que podem reconhecer calor, frio, humidade, pressão, superfície física, entre outras percepções. Da mesma forma que no sinal óptico, estas características físicas observadas são transmitidas através de sinal eletromagnético para a Base onde esta decide os próximos passos que a aeronave vai realizar.

Desta forma, o conjunto de sensores e atuadores operam de forma síncrona, utilizando a colaboração ativa entre as aeronaves MAV e a Base. Diferentemente que nas abelhas, pois estas tomam sua decisão por si só, uma vez que as aeronaves se comunicam o tempo todo com a Base e

não tomam nenhuma decisão nem movimento motor sem que a Base decida se deve ou não realizar a operação pelos atuadores.

Este princípio é realizado para diminuir o tamanho, o volume e o peso das aeronaves MAV. Nada pode ser exercido pelas aeronaves MAV sem que a ordem passe e seja emitida pela construção de estratégia feita pela Base.

O tamanho e peso médio de uma abelha opera em torno de 2 cm de comprimento e 16 a 24 gramas de peso. O ideal que é a aeronave MAV opere na mesma faixa de comprimento e peso. A proposta ideal da construção de uma aeronave MAV é ela ser do tamanho de um chip pequeno, com todas as funções de sensores (par de olhos, o par de antenas e os pelos de sua superfície) e de atuadores (o par de asas: alguns autores defendem que são 2 pares de asas; 3 pares de patas e o ferrão no abdome).

No caso das MAV é necessário que o chip possua todas as variáveis de sensores e controles de envio e recepção das informações para a Base. Ou seja, num único chip deve-se ter os circuitos de comunicação de rádio entre a MAV e a Base e entre a MAV e outras MAV; captação de sensores ópticos, captação de sensores táteis, e captação de sensores auditivos, incluindo no mesmo chip a capacidade de ativação dos atuadores (asas, patas e outros atuadores; no caso das abelhas: ferrão).

Os atuadores das asas e das patas são fundamentalmente operados com sistemas piezo-elétricos. Onde um sinal elétrico consegue manusear um atuador mecânico de operação com pressão física.

Ou seja, as aeronaves MAV operam com sensores e atuadores o tempo todo, pois a qualquer momento a aeronave MAV consegue perceber um objeto procurado (por exemplo drogas ou armas ou explosivos) e no caso de uma abelha, esta pode localizar a existência de uma florada e deve ser capaz de pousar nesta florada e colher pólen, e enviar o pólen para a colmeia.

5.2.4. Sistemas Mecânicos

Os sistemas mecânicos nas abelhas estão baseados no sistema de articulação das asas, na estrutura das asas, no sistema de articulação das patas e na estrutura das patas. A combinação de estruturas de asas e estrutura de patas, permite que as abelhas exerçam tanto a decolagem VTOL, quanto a estratégia e dinâmica de voo e o pouso VTOL. Ou seja, a combinação de asas e patas permitem que as abelhas exerçam todo o ciclo de voo necessário para cumprir a estratégia e a missão de voo a qual está designada.

Os Sistemas Mecânicos utilizam-se de articulações nas patas no caso das aeronaves MAV podem ser de dois tipos: ou utiliza-se de um sistema de articulação por flexão de haste (numa peça de arame único), ou uma estrutura que utilize uma articulação piezo-elétrica que realiza a flexão da haste (com duas ou três peças flexíveis).

Em relação aos pares de asas (2 pares de asas: um par exterior e um par posterior), as aeronaves MAV ao se utilizar de sistemas piezo-elétricos para flexão das asas, permite que estas operem com arrasto forte para baixo, com torção horária quando está em baixo e arrasto fraco para cima, com torção anti-horária quando está em cima.

Portanto o Sistema Mecânico das aeronaves MAV é muito similar ao sistema mecânico das abelhas, com 2 pares de asas flexíveis e 3 pares de patas também flexíveis. Com este conjunto de asas e patas, as aeronaves MAV se capacitam para decolagem e pouso vertical (VTOL) e utilizam-se de um modelo de voo totalmente diferente dos helicópteros, dos drones, dos aviões de asa fixa.

As patas das aeronaves MAV podem ser usadas para captar ou pegar um objeto específico, como por exemplo amostras de drogas, e podem também usar dentro de seu sistema de voo um sistema fotográfico e de vídeo, cujas imagens são captadas e enviadas para a Base. Assim a Base pode apresentar para seu usuário informações visuais captadas pela máquina de vídeo das MAV.

Os Sistemas Mecânicos das Aeronaves MAV são fundamentalmente resumidos em 2 pares asas flexíveis para voo VTOL e conjunto de 3 pares de patas para pouso em qualquer superfície irregular. Todos os outros sistemas são sistemas eletrônicos para apoio e controle de voo.

A proposta de imitar um sistema mecânico de voo das abelhas é muito bem vista por esta tese, uma vez que o modelo apresentado pelas abelhas é bastante eficiente e eficaz, enquanto que se trata de objeto voadores de pequeno porte.

A aplicação de aeronaves voadoras de pequeno porte é baseada em força de arrasto das asas para baixo e para cima, enquanto que nos aviões de asa fixa este processo é baseado no ganho vertical provocado pela velocidade de avanço de uma superfície aerodinâmica.

São, portanto, 3 modelos totalmente distintos: onde um é aplicável para sistemas de pequeno porte, enquanto o outro é aplicável em aeronaves médias e grandes; e também é aplicável em aeronaves de asa rotativa.

Nos dois modelos de grande e médio porte (asa fixa e asa rotativa) o sistema mecânico é fundamentalmente construído para grandes velocidades e asas aerodinâmicas; enquanto que no modelo de pequeno porte (abelhas e MAV) o sistema mecânico é construído para batimento em altas frequências e asas flexíveis e de torção.

Assim, tratam-se de modelos de voo totalmente distintos, onde a natureza e os sistemas biônicos separam em aves de médio e grande porte, e insetos de pequeno porte. Os modelos de voo das aves e dos insetos tem esta separação no perfil de voo de maneira completamente diferente entre um modelo e outro.

5.2.5. Sistemas de Voo dos Veículos

Estruturas MAV precisam constituir um conjunto de sistemas e de veículos de voo que são formados pelas asas, pela estrutura de vibração das asas no caso de sistemas de voo piezoelétrico, ou em micro-motores no caso de usá-los para empuxo vertical e horizontal, estruturas de

trem de pouso, ou seja, mecanismo para estabilizá-los no solo ou em outra superfície qualquer. Os sistemas de veículos de voo são o conjunto de equipamentos que capacitam uma aeronave MAV para voar e realizar sua missão a contento.

Usando o par de asas exteriores as aeronaves MAV realizam voo vertical, seja VTOL ou mesmo voo pairado. Já ao se usar o par de asas posteriores as aeronaves MAV passam a realizar voo horizontal e ou guinado.

Portanto os sistemas de voo dos veículos MAV se baseiam nestas duas condições (voo vertical e voo horizontal) sendo que as duas funções de voo ocorrem de forma independente. Ou seja, as aeronaves podem exercer somente o voo vertical, ou podem também usar voo pairado na vertical simultaneamente com princípio de voo horizontal frontal ou horizontal guinado.

Isto posto, as aeronaves MAV podem receber como missão exercer voo pairado para realizar fotografias e/ou filmagem de determinado conjunto de objetos. Este princípio de voo pode usar voo VTOL, voo pairado ou voo frontal e/ou voo guinado. Permitindo que as imagens captadas executem subida, descida, avanço, recuo e guinada.

O sistema de voo das aeronaves MAV tem todo este cabedal de operações, sendo capaz de realizar qualquer tipo de voo, para captar todo o tipo de informações, sejam elas informações ópticas, auditivas e/ou táteis. Entre as informações ópticas incluem-se imagens fotográficas e imagens filmadas. Estas imagens filmadas e fotográficas são emitidas de maneira online, ou seja, em tempo real para a Base para que esta tome a decisão dos próximos passos e defina a nova estratégia a ser comandada para as MAV.

Em relação ao sistema de voo das asas das aeronaves MAV, é fundamental estabelecer que as asas das MAV possuem uma estrutura flexível, ou seja, a asa realiza um movimento de flexão que diminui e aumenta a extensão do raio da asa. Além da capacidade de flexão que as asas possuem, estas asas também são capazes de executar torção em sua base. Esta torção ocorre no sentido horário quando a asa estiver posicionada em seu movimento mais baixo. E a torção ocorre no sentido anti-horário quando a asa estiver posicionada em seu movimento mais alto. Esta orientação é válida para a asa da direita. Já para a asa da esquerda o processo é inverso, ou seja: a torção

ocorre no anti-horário quando a asa estiver posicionada em seu movimento mais baixo. E a torção ocorre no sentido horário quando a asa estiver posicionada em seu movimento mais alto.

Esta combinação inversa entre a asa da direita e a asa da esquerda é fundamental para exercer o equilíbrio vertical das aeronaves MAV. Se o batimento ocorresse em somente uma das duas asas exteriores a aeronave MAV ficaria em desequilíbrio. Já nas asas posteriores isso não ocorre, ou seja, a asa posterior da esquerda pode operar sem a da direita e esta condição gera uma guinada em sentido horário, já se a asa posterior direita operar sem a asa da esquerda, esta condição gera uma guinada em sentido anti-horário.

Quando as duas asas posteriores operam simultaneamente estas geram um movimento horizontal frontal. Desta forma as aeronaves MAV operam de forma flexível para todas as direções incluindo frente, costa, subida, descida e pairado.

Os Sistemas de Voo dos Veículos MAV conseguem exercer todo o tipo de espionagem, pois sua capacidade de voo é completa e totalmente abrangente, permitindo que sensores ópticos, auditivos e táteis sejam exercidos de forma completa e totalmente eficaz e eficiente.

Sem estes sistemas de voo das aeronaves MAV, os sistemas de sensores não conseguiriam exercer suas funções com sucesso. Somente com os sistemas de voo realizando operações 100 % flexíveis é que se consegue utilizar seus voos com eficácia. Este tipo de aeronave MAV pode ser usada para substituir os tradicionais drones no sentido de se realizar operações sem carga, mas com capacidade de levantamento de imagens de fotografia e de vídeo. Com a vantagem de por serem pequenos, os MAV podem se passar por insetos (abelhas), sem serem percebidos. Os drones não conseguem se esconder, pois ocupam espaço físico considerável.

5.2.6. Processos de Fabricação

Os processos de fabricação dos equipamentos MAV passam pelos conceitos e técnicas de engenharia microeletrônica e também de nanotecnologia. Os sistemas de fabricação tanto dos sensores, quanto dos atuadores e da estrutura dos MAV são construídos utilizando-se de técnicas de miniaturização óptica. Ou seja, fabrica-se todos os sistemas em tamanho visível e utilizando-se de tecnologia de miniaturização óptica diminui-se os tamanhos e pesos dos equipamentos para tamanhos não visíveis a olho nu.

Ou seja, o processo de fabricação dos equipamentos MAV equivale a construção de circuitos eletrônicos de chips. Todos os sensores lógicos e atuadores mecânicos são construídos a partir de tecnologias ópticas de engenharia microeletrônica, capazes de transformar circuitos lógicos em sistemas de atuação tanto de sensores quanto de atuadores.

Em relação aos sensores e aos sistemas de comunicação, estes são construídos utilizando-se de técnicas de microeletrônica, já os sistemas mecânicos de voo das asas são construídos utilizando-se técnicas de fabricação por corte a laser e/ou eletro-erosão.

As asas são construídas com corte a laser e/ou técnicas de eletro-erosão e são montadas utilizando em sistemas piezo-elétricos em sua base. Estes sistemas piezo-elétricos têm como meta realizar os movimentos de batimento e torção das asas.

Ou seja, estamos falando de 4 processos de fabricação em paralelo: o primeiro processo de fabricação de microeletrônica para construção de chips dos circuitos lógicos, um segundo processo de corte a laser e/ou eletro-erosão para fabricação das asas e dos atuadores; e um terceiro processo de sistemas piezo-elétricos para batimento e torção das asas. E um quarto processo de sensores ópticos, auditivos e táteis.

Estes 4 sistemas de fabricação operam de forma simultânea e em paralelo, pois qualquer modificação que ocorram em um dos 4 sistemas interferem na montagem dos outros dois sistemas. É portanto, fundamental que o processo de fabricação dos 4 sistemas ocorra em sintonia um com os

outros. A proposta então é de usar um chip eletrônico, 2 pares de asas (um par exterior e um par posterior), 3 pares de patas e os conjuntos de sensores. Sendo que em torno do chip armazena-se todos os sensores necessários e também todo o processo de rádio comunicação eletroeletrônico com a Base e com os outros MAV. Ou seja, em torno do chip está armazenado todo sistema eletroeletrônico de recepção de informações, incluindo sensores ópticos, auditivos e táteis. Já dentro do chip armazena-se todo o processo lógico e de comunicação de emissão e de recepção com os outros MAV e com a Base.

O processo de fabricação dos chips, das asas, dos pares de patas e dos conjuntos de sensores ocorre de forma paralela e independente, porém simultânea e de forma síncrona, uma vez que a fase final do processo de fabricação é realizar a montagem e os testes de operação. Os testes após a montagem operam de maneira a testar a comunicação, a leitura dos sinais eletroeletrônicos, de vídeo e de imagem, auditivos e táteis, pouso e decolagem VTOL e em superfícies irregulares, recepção dos sinais emitidos pela Base e por outras aeronaves MAV, exige que as aeronaves MAV exerçam toda a sua missão de forma satisfatória.

Ou seja, a fase inicial do processo de fabricação realiza-se em construir os chips, as asas, as patas e os conjuntos de sensores, todos em paralelos e independentes. A segunda fase provoca a montagem dos 4 sistemas em um único equipamento consolidado; e a terceira fase realiza os testes de operação e simulação dos 4 sistemas operando em paralelo e de forma síncrona.

Somente com a execução satisfatória dos testes de operação e das simulações é que o equipamento se encontra pronto para entrar em operação em um caso real. É importante salientar que um caso real o sistema é utilizado para caçar e localizar drogas, armas, bombas e outros artifícios, utilizados de forma criminosa.

Para a eficaz operação de caça, o conjunto de sistemas dos 4 processos de fabricação (o primeiro processo de fabricação de microeletrônica para construção de chips dos circuitos lógicos, um segundo processo de corte a laser e/ou eletro-erosão para fabricação das asas e dos atuadores; e um terceiro processo de sistemas piezo-elétricos para batimento e torção das asas. E um quarto processo de sensores ópticos, auditivos e táteis) precisam operar com 100% da capacidade. Uma pequena falha na fabricação pode comprometer toda a operação em si.

5.2.7. Ambiente de Testes

Os testes de voo e de navegação dos MAV devem ser realizados inicialmente em ambientes de salas limpas para evitar a influência indesejada de fatores externos. Após os testes terem sido bem sucedidos em salas limpas, parte-se para testes e ambientes sem o mesmo rigor das salas limpas; e em seguida realizam-se os testes em ambientes hostis, como por exemplo ambientes de matas fechadas em meio a natureza e também em ambientes tóxicos ou de irradiação. Os testes devem exercer todo e qualquer tipo de avaliação, seja na decolagem VTOL, seja no voo de missão, seja no seu retorno, ou mesmo no pouso VTOL.

Desta forma os testes são realizados de forma progressiva, desde um ambiente limpo e controlado até um ambiente hostil como por exemplo uma mata aberta e finalmente para um ambiente com a localização de tóxicos e radioativos. Somente após estes testes de ambientes tóxicos e radioativos é que a aeronave MAV é colocada em uma missão oficial.

Não se pode colocar uma aeronave em missão oficial sem que esta tenha sido testada em um ambiente hostil. Somente com a aprovação da missão em um ambiente hostil controlado é que a aeronave MAV entra em operação verdadeira.

É muito interessante realizar os ambientes de teste com diversos e diferentes sistemas de hostilidade, entre eles não somente ambientes tóxicos, como também ambientes radioativos, presença de bombas, presença de armas, presença de drogas de todos os tipos,

A aeronave MAV pode e deve conseguir localizar todos estes tipos de toxicidades entre eles sistemas tóxicos, ambientes radioativos, presença de bombas, presença de armas, presença de drogas entre outros sistemas hostis que possam vir a ser localizados e trabalhados de forma a agir e corrigir a presença destes.

É fundamental que os ambientes de testes sejam o mais similar possível de um ambiente verdadeiro. Ou seja, as bombas, as armas, as drogas e os sistemas radioativos e tóxicos devem trabalhar de maneira a estarem bem escondidas e disfarçadas de forma que a localização das mesmas seja muito difícil de se executar.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

As bombas, as drogas e as armas entre outros objetos a serem localizados devem estar escondidos tanto em falsos armários, como em falsos pisos, ou mesmo em fundos falsos em veículos terrestres e aquáticos. E também em falsos produtos que venham a esconder os objetos a serem procurados.

O ambiente de teste tem que ser capaz de simular todas estas condições de trabalho, de maneira que nenhum processo de ocultação das drogas, das bombas, das armas entre outras seja esquecido e não seja testado.

O ambiente de teste tem que ser completo e totalizado em quaisquer situações que possam a vir a serem exercidas e não sejam esquecidas ou deixadas de lado. O ambiente de teste tem que simular chuva, brisa, vento fraco e vento forte, granizo, alta ou baixa umidade, calor, frio, neblina ou seja todas as condições ambientais. Incluindo operações em mata fechada, no litoral, em montanhas, com neve, em pequenas, médias e em grandes cidades, em ambiente poluído ou não poluído.

As aeronaves MAV operando em conjunto com a Base precisam trabalhar com todas estas condições ambientais e todo o tipo de adversidade de clima. Estes conjuntos de qualidades de ambientes de testes necessitam ser construídos e simulados em Laboratório Específico para Testes de Aeronaves MAV.

Somente com a construção de um Laboratório Específico pode se ter a certeza de que a operação das aeronaves MAV será bem sucedida. Não se pode trabalhar com 100% de certeza sem que as aeronaves MAV venham a serem testadas neste Laboratório Específico.

Ou seja, a soma total e correta para a operação bem satisfatória ocorre com aeronaves MAV, Estrutura Base e Laboratório Específico.

Equipes de Pesquisa [5]:

Há muitas pesquisas na área de Sistemas Biomiméticos e/ou Biônicos e de MAV em diversas aplicações de diferentes laboratórios. Estas pesquisas estão recebendo um apoio bastante eficaz do governo norte-americano.

A seguir segue os laboratórios e centros de pesquisa que estão estudando os princípios de voo e de comportamento dos animais com o propósito de aplicá-los em aeronaves feitas pelo homem. São eles:

5.3.1. Aeronáutica

5.3.2. Marinha

5.3.3. Exército

5.3.4. Agência de Projetos de Pesquisa e Defesa Avançada (DARPA)

5.3.5. Escritório de Pesquisa Naval (ONR)

5.3.6. Centro de Armas Navais sub oceanos (NUWC)

5.3.7. Laboratório de Pesquisa Naval (NRL)

5.3.8. Escritório de Pesquisa Científica da Força Aérea (AFOSR)

5.3.9. Laboratório de Pesquisa da Força Aérea (AFRL)

5.3.10. Escritório de Pesquisa do Exército

5.3.11. Laboratórios de Pesquisa da NASA

5.3.12. No Brasil especificamente no ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica) há um Laboratório chamado LNCA (Laboratório de Novos Conceitos de Aeronáutica) que estuda diversos temas de voo e novos conceitos de voo, diferentes dos Sistemas tradicionais de Asa Fixa, de Asa Rotativa e de Propulsão de Foguetes.

Pesquisa em Áreas Potenciais [5]:

Entre as diversas pesquisas que estes laboratórios estão realizando são descritas as seguintes áreas de conhecimento. Conhecimento este que envolve todas as áreas de ciência e de engenharia de sistemas biológicos para sistemas construídos pelo homem.

As diversas áreas de Pesquisa envolvem desde materiais até estruturas, controle e navegação, aeronáutica, sistemas biomiméticos e bióticos.

Em relação a materiais as aeronaves MAV utilizam-se de equipamentos flexíveis como por exemplo policarbonato e estruturas piezo-elétricas que podem vir a movimentar os plásticos a sua volta. Plásticos estes que podem ser policarbonato ou outros. As asas precisam ser flexíveis para que elas possam fletir aumentando e diminuindo o raio de extensão das mesmas, de forma a aumentar ou diminuir o comprimento delas.

Este aumento ou diminuição da extensão das asas só pode ser executado através de estruturas piezo-elétricas e cobertura de plástico. Ou seja, os equipamentos piezo-elétricos fletem e a asa dobra diminuindo o comprimento do raio de extensão.

Em relação ao controle e navegação, pode-se estabelecer um princípio de controle onde se estabelece o voo vertical, o voo horizontal e o voo guinado de forma que a Base define quanto deve ser executado por cada um destes 3 princípios. Ou seja, realiza-se um princípio de voo em malha fechada de maneira a executar corretamente o voo vertical, o voo horizontal e o voo guinado.

Através de um sistema de malha fechada, a Base comanda o voo vertical, a velocidade de voo horizontal e através de uma bússola digital realiza o voo guinado, também em malha fechada.

Em relação a aeronáutica, o sistema de voo das MAV trabalha com batimento das asas e não como as tradicionais asas fixas de aviões e asas rotativas de helicópteros e/ou drones. A aeronáutica das

asas dos MAV opera com batimento vertical de a grande arrasto da asa para baixo e pequeno arrasto da asa para cima e torção horaria e anti-horária.

E diversos modelos de sistemas biomiméticos e bióticos tanto em voo VTOL, quanto em voo pairado, voo frontal e voo guinado. Ou seja, tecnologia mecânica e eletrônica e de software que imitem o voo biológico das abelhas, dos zangões e da abelha rainha. Sendo que a tecnologia mecânica e eletrônica simplificada se posiciona na aeronave MAV e os sistemas de software e eletrônica complexa se posicionam dentro da Base.

As pesquisas em áreas potenciais envolvem o estudo de outros sistemas biológicos como por exemplo o voo das borboletas, dos beija-flores, o voo das águias, o comportamento aquático dos tubarões, dos crocodilos, a natação e deslocamento terrestre das cobras, o comportamento de macacos nas árvores e a dinâmica de caça dos leões. Estes apenas para serem citados, contudo os sistemas bióticos envolvem toda uma fauna de animais e seres cujo comportamento deve ser estudado e imitado.

Ou seja, todos os conjuntos de animais são e estão em potencial para serem estudados e implementados imitando todo e qualquer tipo de animal seja, insetos, anfíbios, répteis, peixes, aves e mamíferos.

Os sistemas bióticos são áreas de Pesquisa em Setores Potenciais para serem estudadas, aprendidas, compreendidas prototipadas e implementadas. A proposta desta tese é desenvolver um setor de Engenharia Biônica, de forma que se desenvolva uma cadeira de engenharia que some modelos matemáticos com modelos fisiológicos e anatômicos de seres e de diferentes biológicas.

Somente com uma cadeira que una matemática, física, anatomia e fisiologia de animais é que se pode constituir uma estrutura educacional em Engenharia Biônica. A proposta é constituir uma cadeira de graduação em várias escolas de engenharia e não uma cadeira de pós-graduação em algumas poucas escolas de engenharia.

Há a necessidade de se construir, para uma cadeira de Engenharia Biônica, um ou mais Laboratórios de Animais seja entre eles, insetos, anfíbios, répteis, peixes, aves e mamíferos. O ideal é ter um laboratório para cada uma destas famílias de animais.

5.4.1. Materiais

Estudo de materiais flexíveis (das asas), de torção (das asas), de apoio em solo (das patas), de comunicação (das antenas), da defesa (do ferrão). Estes materiais tendem a serem imitados utilizando-se diferentes processos físico químicos para que sejam capazes de serem reproduzidos em laboratório.

Primeiramente vamos falar sobre os materiais flexíveis das asas. O aumento ou a diminuição do raio de extensão das asas altera o valor da força de arrasto das mesmas. Quanto maior for o raio de extensão, maior será sua força de arrasto, pois a força de arrasto depende do raio ao cubo:

$$F_{arr} = 1/2 \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot R \cdot b + 1/2 \cdot \rho \cdot (w \cdot h^2 \cdot R^2) / 4 \cdot S \cdot c_d$$

F_{arr} = força de arrasto

ρ = densidade do ar

w = velocidade angular das asas

R = raio de extensão das asas

b = corda média da asa

c_d = coeficiente de arrasto

Assim, quanto maior for o raio de extensão da asa, maior será a força de arrasto. No entanto, como a asa realiza batimento para cima e para baixo na velocidade da frequência de batimento, a Força de Arrasto somente será positiva quando o empuxo empurrar a força para baixo, ou seja, o corpo será levado para cima. Quanto a asa realizar empuxo para cima, ou seja, o corpo será levado para baixo as asas criarão empuxo no sentido inverso.

Para poder-se executar este movimento de batimento de forma eficaz a asa de ser construída em um material flexível como por exemplo algum tipo de plástico flexível tal qual poliuretano, delrin, PVC, policarbonato ou outro.

Já a estrutura da asa que gera o empuxo vertical para cima e para baixo e ou o movimento de torção horária ou anti-horária deve ser construído através de um esqueleto de silício para poder executar a torção piezo-elétrica. O silício é um material que opera de forma a alterar seu comprimento e sua flexão através de um sinal elétrico. Ou seja, altera a sua pressão em função da alteração da sua tensão elétrica.

Assim a atuação piezo-elétrica das asas trabalha tanto de maneira a aumentar ou diminuir a extensão das asas como também opera de maneira a torcer asas de forma movimentar no sentido horário e anti-horário.

Em relação ao apoio em solo, é também interessante utilizar-se de silício nas patas, pois estas podem realizar um movimento de flexão durante o pouso de maneira a diminuir o impacto no chão ou em qualquer superfície em que o MAV realizar seu aterramento.

Em relação às antenas, estas devem usar de material elétrico condutor para executar sua comunicação com outros MAV e com a Base. As antenas podem usar por exemplo cobre, ou outro material metálico condutor que permite comunicar-se através de sinais eletromagnéticos.

No caso das abelhas, estas possuem ferrão de ataque. Já as aeronaves MAV não necessitam utilizar-se deste recurso, uma vez que a missão das MAV não é atacar um oponente, mas sim observar e relatar esta observação para a Base, para que esta tome uma decisão sobre a missão das MAV.

Há também nos MAV um material plástico pintado no corpo e nas cores das abelhas, para que este consiga se posicionar de forma a estar disfarçado de uma abelha verdadeira.

Ou seja, os principais materiais que as MAV necessitam utilizar são silício, cobre, plásticos (poliuretano, delrin, PVC, policarbonato ou outro), todos pintados de forma a operarem como uma abelha verdadeira.

Além disso os sistemas de lógica operacional e de comunicação das aeronaves MAV são constituídas de chips eletrônicos que realizam toda operação digital da máquina de estado e comunicação com outras MAV e com a Base.

5.4.2. Estruturas

As abelhas possuem estruturas bastante eficazes quando se estuda e analisa a composição de suas asas. Asas possuem estruturas longitudinais, laterais e radiais, além de uma manta que cobre toda a asa, unindo sua estrutura. As abelhas também possuem uma estrutura bastante interessante quando se estuda a dinâmica de comportamento de suas patas em decolagem e pouso VTOL, ou mesmo em solo.

Assim uma estrutura mecânica posicionada sobre as asas pode ser constituída por uma estrutura em árvore, ou seja, um caule principal que vai da base da asa até seu limite radial e diversos ramos radiais que são posicionados desde o caule principal até a extremidade da asa. Esta construção permite e deve ser fabricada por materiais piezo-elétricos, materiais estes que permitem fletir a asa tanto no escopo radial do caule principal quanto do escopo de ramos radiais.

Esta constituição de estrutura das asas permite principalmente alterar as dimensões de arrasto das asas, onde quanto maior for o raio e quanto maior for os ramos, maior será sua força de arrasto, pois maior serão os R (Raio de extensão da Asa) e os b (corda média da Asa).

Desta forma estamos falando de uma alteração da intensidade de força que altera somente as questões geométricas, e devemos lembrar também que uma alteração na frequência de batimento também altera a intensidade da força de arrasto.

Além das estruturas esqueléticas em forma de ramos de folhas das asas existem também uma outra estrutura esquelética nas patas das MAV. As patas também devem trabalhar com princípios piezo-elétricos para realizar um amortecimento no momento do pouso e também no momento da decolagem. Ou seja, as patas realizam um movimento de flexão em três partes sendo que duas partes são os sistemas piezo-elétricos e as três partes são o esqueleto ósseo.

Desta maneira o MAV possui 3 pares de patas, cada uma delas com 3 partes ósseas e 3 partes articuladas por piezo-eletricidade.

Ou seja, quando uma aeronave MAV realiza um pouso vertical (VTOL) esta executa uma flexão das articulações que imitam o movimento de fêmur, joelho e tornozelo (onde o fêmur, joelho e tornozelo são articulados imitando a piezo-eletricidade).

A terceira estrutura fundamental para a operação das MAV é a estrutura lógica dos chips que executa a máquina de estado e o sistema operacional e de comunicação. A princípio estamos falando de apenas um chip que executa toda a máquina de estado desejada e este chip é camuflado de maneira a não ser percebido e passe facilmente por uma abelha verdadeira.

A quarta estrutura fundamental para as MAV se trata de um par de antenas que emite e recebe informações eletromagnéticas vindas ou emitidas da Base e/ou vindas ou emitidas de outras MAV.

A quinta estrutura fundamental para as MAV se enquadra como uma bateria de íon de lítio ou fonte de energia propulsora, que pode ser disfarçada na posição do ferrão da abelha. A bateria de íon de lítio opera com voltagem constante e se mantém ativa até o momento de ser obrigada a pousar e voltar para a Base para realizar uma nova recarga.

Assim estamos apresentando 5 estruturas, entre elas uma primeira estrutura em forma de ramos de folhas constituindo dois pares de asa (exterior e posterior), uma segunda estrutura de 3 pares de patas constituindo (para cada pata: fêmur, joelho e tornozelo articulados), uma terceira estrutura lógica constituída pela máquina de estado em operação digital (chip disfarçado de corpo de abelha), uma quarta estrutura de antenas para comunicação e uma quinta estrutura de bateria de íon de lítio (disfarçada junto ao corpo da abelha, onde se esconde o ferrão para operar como fonte de energia para as aeronaves MAV).

5.4.3. Controle e Navegação

O sistema de controle e navegação das abelhas é baseado na combinação de visão, de audição, de comunicação, de pouso e de voo para um determinado destino. O estudo de controle e de navegação destes animais exercem um cabedal enorme para pesquisa a ser desenvolvido por diferentes equipes que devem atuar de forma multidisciplinar. Pois a compreensão do modelo fisiológico e anatômico junto com o modelo de voo aerodinâmico se estabelece como um grau extremamente rico em ciência e em conhecimento matemático e técnico. O estudo deste modelo de controle e de navegação passa por esta equipe multidisciplinar pois a engenharia pode aprender com a biologia e a biologia pode aprender com a engenharia.

Para uma aplicação de controle e navegação de uma MAV passamos pelo princípio de malha fechada, onde se controla a altitude, a guinada e a velocidade de voo frontal. No caso do controle de altitude quem comanda a altitude desejada é a Base que emite para a aeronave MAV qual deve ser a curva de subida e de descida. A Base emite para a MAV a altitude desejada e esta última através de um modelo de malha fechada realiza o voo vertical.

Existem 4 variáveis de controle de altitude, onde a altitude é posicionada de acordo com as seguintes variáveis: frequência (f em Hz), raio da asa (R em milímetros), corda média da asa (b em milímetros) e c_d (coeficiente de arrasto).

Com a alteração destas 4 variáveis ocorre a variação da força de arrasto que através das asas exteriores realizam o voo vertical, incluindo o voo VTOL. É interessante saber que a frequência trabalha com seu valor ao quadrado, o raio trabalha com seu valor ao cubo e a corda da asa e o coeficiente de arrasto trabalham com seu valor linear.

Em relação ao voo de guinada este trabalha com uma asa exterior de cada vez. Quando a asa esquerda realiza seu empuxo para trás, a aeronave MAV realiza uma guinada no sentido horário, já quando a asa direita realiza seu empuxo para trás, a aeronave MAV executa sua guinada no sentido anti-horário. Do mesmo jeito que o voo vertical executa empuxo para cima através das asas exteriores, no caso do voo

guinado ocorre o empuxo para frente através das asas posteriores, utilizando as variáveis f (frequência), R (Raio da Asa), b (corda média da asa) e c_d (coeficiente de arrasto).

Do mesmo jeito que a força de arrasto opera para cima com as asas exteriores e para guinada com as asas posteriores, sendo uma de cada vez, com as asas posteriores trabalhando em sincronia e em conjunto ocorre o voo frontal de velocidade proporcional à integral da força de arrasto dividida pela massa da MAV. Ou seja:

$$F_{arr} / m = d^2x/dt^2$$

$$\left(-\frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b c_l \right) - \left(\frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 S h c_d \right) + \frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 S h / m = dv/dt$$

Onde:

F_{arr} = força de arrasto

m = massa da MAV

d^2x/dt^2 = aceleração frontal

ρ = densidade do ar

w = velocidade radial batimento das asas

wh = velocidade de batimento das asas posteriores

R = raio de extensão da asa

Rh = raio de extensão das asas posteriores

b = corda média da asa

S = área da asa exterior

Sh = área de asa posterior

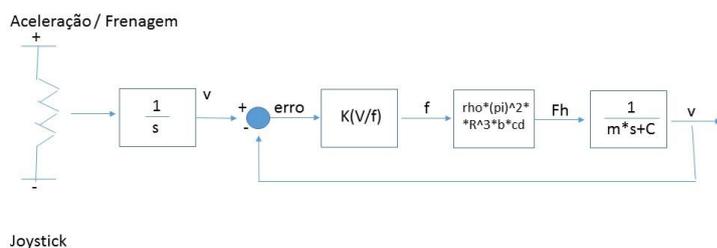
c_d = coeficiente de arrasto

dv/dt = aceleração frontal dada pela velocidade

v = velocidade frontal

O controle e a navegação pode ser apresentados da seguinte maneira: fixa-se o Raio numa medida pré-estabelecida, fixa-se a corda b numa medida pré-estabelecida, fixa-se os coeficientes de arrasto em duas medidas pré-estabelecidas sendo uma para cima, outra para baixo, e altera-se a frequência de batimento para mais ou para menos de uma frequência média, da seguinte maneira pelo Modelo de Malha Fechada (onde a aceleração e frenagem desejados são impostos pela Intensidade apresentada pela Base numa missão específica). Estabelece-se a seguir o Sistema de Controle de Voo de Velocidade e Frenagem:

Sistema de Controle de Voo de Velocidade e Frenagem



Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

5.4.4. Aeronáutica

O modelo de voo aeronáutico das abelhas é totalmente diferente dos modelos de asa fixa dos aviões, de asa rotativa dos helicópteros, e de empuxo dos retrofoguetes ou de outros modelos baseados no conhecimento tradicional humano de aeronaves. Apesar de ser um modelo totalmente diferente, o ser humano tem um enorme conjunto de variáveis que podem ser aprendidas e compreendidas para aplicação em aeronaves feitas pelo homem, como por exemplo para diversos MAV que venham a imitar a dinâmica de voo das abelhas.

O primeiro grande princípio a ser estudado pelo voo das abelhas se trata do modelo de alta frequência de batimento das asas. Somente com o batimento vertical não seria possível realizar o voo

vertical, pois o arrasto para baixo seria igual ao arrasto para cima e conseqüentemente o impulso resultante seria igual a zero. Por este motivo as asas realizam não somente o batimento vertical, mas também realizam a torção anti-horária quando a asa está em seu posicionamento superior de batimento e realizam a torção horária quando a asa está em seu posicionamento inferior. Desta forma o arrasto para realizar o empuxo do corpo do MAV para baixo é mínimo enquanto que o arrasto do corpo para realizar o empuxo para cima é máximo. Gerando, portanto, um impulso resultante que empurra a aeronaves para cima.

Esta é a primeira grande diferença entre o princípio aerodinâmico das asas dos aviões e das pás dos helicópteros. Ou seja, as asas dos aviões e as pás dos helicópteros não realizam empuxo através de batimento, pois realizam sustentação provocada pela velocidade das asas e das pás através de seu perfil aerodinâmico.

As asas das aeronaves MAV executam dois movimentos fundamentais: frequência de batimento e torção horária e anti-horária. Ou seja, opera com uma frequência média de 190 Hz de batimento e realiza a torção horária e anti-horária nas extremidades do batimento abaixo e acima respectivamente, Este princípio é adequado para pequenas aeronaves, equivalente na biologia e na fauna de insetos, porém não se trata de um modelo viável quando se fala de aeronaves maiores devido ao momento de inércia muito grande nas aeronaves de porte maior. Isto posto não somente é inadequado para aeronaves de grande porte, mas também não é observado na fauna em pássaros maiores.

Desta forma estamos falando e discutindo que o modelo aerodinâmico de voo dos aviões e dos helicópteros é totalmente diferente do modelo de voo das abelhas e das aeronaves MAV. Uma vez que as aeronaves MAV e as abelhas trabalham com batimento em frequência e torção horária e anti-horária nos limites inferior e superior respectivamente, enquanto que as asas dos aviões e as pás dos helicópteros operam com sustentação provocada pela grande velocidade e perfil aerodinâmico das mesmas.

Assim sendo fala-se de dois princípios de aeronáutica totalmente diferentes, sendo que o princípio de voo dos aviões é observado nas aves de grande porte, enquanto que o princípio do voo dos MAV é observado nos insetos, ou seja, animais de pequeno porte.

E a grande diferença que existe entre os aviões, os helicópteros e as aeronaves MAV está relacionado às dimensões de grande porte das asas nos aviões e ao pequeno porte das asas das abelhas, dos

insetos em geral e em fim nas aeronaves MAV.

As asas dos aviões e dos helicópteros possuem um momento de inércia bastante elevado o que inviabiliza o movimento de frequência de batimento, pois os esforços inerciais seriam muito grandes. Enquanto que na aplicação de asas de pequeno porte, como nas abelhas, sua área é muito pequena o que geraria um empuxo vertical bastante baixo, somente viável com altas taxas de velocidade e frequência de batimento. Por isso não existem insetos com grandes asas, nem grandes pássaros com asas realizando batimento em frequência.

Desta forma, imitando a natureza, não podem existir aeronaves MAV com grandes asas, nem aviões e/ou helicóptero com asas operando com alto batimento em frequência.

Parece complexo, mas é extremamente simples: aviões e helicópteros operam sem batimento em frequência, e com perfil de asa aerodinâmico; e as aeronaves MAV operam com batimento em frequência e com perfil de asa de arrasto vertical quando do empuxo da aeronave para cima, com arrasto máximo e com empuxo da aeronave para baixo com arrasto mínimo. O que gera a alteração de arrasto para cima e para baixo se trata da mudança do coeficiente de arrasto para cima e para baixo. O coeficiente de arrasto que empurra a aeronave para cima é extremamente grande, enquanto que o coeficiente de arrasto que empurra a aeronave para baixo é extremamente pequeno.

Essa diferença de aeronáutica e no comportamento aerodinâmico das aeronaves MAV quando comparada às aeronaves de grande porte, trata-se de uma solução que a natureza construiu e que cabe aos Engenheiros Bióticos estudar e aprender com ela. Deus construiu na natureza um grande laboratório de ciência, de biologia, de física, de química e de matemática e cabe aos engenheiros, biólogos, físicos, químicos e matemáticos estudar este grande laboratório e aprender com o Princípio Sagrado. Um simples movimento das abelhas ou de outros insetos e animais pode ser extremamente rico em ciência e tecnologia em potencial.

Por este motivo é que sugerimos que seja implementado nas grandes escolas e academias de engenharia uma cadeira de estudo de ciência biomimética. Ou seja, aquela que imita a biologia. Quando falamos de imitar desejamos corrigir e dizer aprender e imitar.

O que se aprende com a aeronáutica dos insetos, pode-se também aprender com sistemas náuticos de peixes, golfinhos e baleias; sistemas de armazenagem de energia em tecidos de gordura; sistemas de

locomoção terrestre de répteis e anfíbios, sistema de voo das águias; sistemas digestivos de diferentes animais; sistemas de organização coletiva de formigas e cupins, enfim, há uma enormidade de comportamentos biomiméticos a serem estudados e aprendidos numa enorme fauna que existe na natureza criado por Deus.

5.4.5. Sistemas Biomiméticos

Sistemas que imitam a biologia possuem um enorme campo de trabalho e de pesquisa, pois o grau de variação que ocorre na natureza é absolutamente enorme, uma vez que o voo da abelha é diferente do voo da borboleta, que é diferente do voo do gafanhoto, que é diferente do voo do beija-flor, que é diferente do voo da gaivota que é diferente do voo da águia, e assim, por diante. Desta forma se existe um laboratório absolutamente rico em pesquisa, este laboratório é o ambiente da natureza.

Ou seja, o laboratório existente na natureza é enormemente rico em todo e qualquer tipo de movimento e funções físico químicas. E cabe aos engenheiros e cientistas que vierem a imitar e aprender com o comportamento da natureza, desenvolver técnicas e tecnologias que possam vir a corrigir problemas que hoje se apresentam inviáveis e possam vir a ser imitadas e implementadas.

Sistemas Biomiméticos ou sistemas que imitam a natureza são extremamente variados e complexos. Imaginem a riqueza de variedade que ocorre no voo dos insetos, como por exemplo: o voo da abelha, o voo da borboleta, o voo do gafanhoto, o voo do beija-flor, o voo da gaivota, o voo da águia e assim por diante, só para citar alguns casos.

É notoriamente visível que o voo da abelha é totalmente diferente do voo do beija-flor e do voo das águias; ou seja, trata-se de sistemas aerodinâmicos e aeronáuticos totalmente distintos, e cada um tem sua aplicação de inteligência de voo específica. Na natureza a abelha o beija-flor e a águia possuem características geométricas, de volume e de peso específicas para cada um dos casos. Não seria possível adaptar o voo das abelhas numa águia, nem aplicar o modelo de voo da águia num beija-flor ou numa abelha e assim por diante.

A engenharia biomimética é extremamente rica em diversidade e especificidade. Pela simples cadeira de voo e aerodinâmica dos animais é possível dedicar anos de pesquisa, ciência e tecnologia. Por exemplo, um princípio especificamente diferido de voo, trata-se do voo coletivo em diversas direções simultaneamente sem se chocar e sem se colidir. O princípio de voo coletivo das abelhas pode e deve ser matéria de pesquisa para mestrado e doutorado de voo coletivo e simultâneo das aeronaves, sejam elas de pequeno porte ou de grande porte.

O voo coletivo das abelhas que pode e deve ser implementado em um sistema de voo coletivo de aeronaves humanas exige que haja um comportamento inteligente que relaciona todas as aeronaves de voo simultâneo, o que significa que quando uma aeronave faz uma curva para direita, todas as outras aeronaves que realizam o voo simultâneo e em conjunto devem também realizar uma curva para a direita para não ocorrer choques nem colisões no ar em pleno voo.

Ou seja, as aeronaves realizam e executam um voo simultâneo para frente, para direita, para esquerda, para cima e para baixo. Desta maneira todas as aeronaves MAV ou de grande porte devem realizar uma monitoria constante sobre as outras aeronaves que estejam em voo coletivo.

Todo e qualquer sistema biótico deve ser estudado para que se possa enriquecer os modelos de engenharia construídos pela engenharia da natureza. O laboratório da natureza não deve ser apenas estudado por biólogos, mas também deve ser estudado por todo e qualquer tipo de cientista, tecnólogo e engenheiro. As cadeiras de engenharia seriam extremamente mais ricas, quando e se unisse os princípios matemáticos e físicos às disciplinas de anatomia, fisiologia e funções físico-químicas dos animais.

Sistemas tecnológicos que imitam a natureza, ou seja, sistemas biomiméticos permitem que não somente operações de voo, mas também operações de alimentação, de secreção, de caça, de função sexual, de visão, de olfato, de paladar, de sensações, entre outras funções podem ser estudadas imitadas e aplicadas em máquinas construídas pelo ser humano.

Outra função interessante é unir em equipes multidisciplinares os diferentes profissionais:

como por exemplo montar uma equipe híbrida com biólogos, fisiologistas, especialistas em anatomia, médicos, veterinários, engenheiros, matemáticos entre outros. Um time híbrido pode ser muito eficaz para um projeto coletivo e focado em desenvolvimento de máquinas e de sistemas biomiméticos.

Pesquisa de Projeto Morfológicos [6]:

Uma área de pesquisa de sistemas bióticos que abrange um enorme número de variáveis e de sistemas são os projetos baseados nas formas dos seres vivos, ou seja, laboratório de morfologia, ou laboratório da forma fisiológica e anatômica. Cada função biológica de cada ser vivo, possui uma característica morfológica que a mantém e permite exercer esta função. Assim, uma abelha voa porque possui asas, já uma aranha não voa. Cada sistema biótico possui uma função que anda em acordo com sua forma e sua fisiologia anatômica e sua missão de vida.

O estudo e a pesquisa de sistemas bióticos e morfológicos estão diretamente associados às funções biológicas, anatômicas e fisiológicas que os sistemas bióticos exercem em suas funções biológicas.

Ou seja, cada ser vivo exerce diferentes funções biológicas que são associados a diferentes condições morfológicas. Enquanto que as águias voam a velocidades altíssimas e em linha reta, as abelhas voam em velocidades menores e em zigue zague.

Do mesmo modo que as águias não realizam voo VTOL, as abelhas o exercem. Um MAV que imitem as funções bióticas de voo das abelhas, não realizam o modelo de voo das águias. São sistemas de voo totalmente diferentes.

A pesquisa e o projeto de voo de diferentes seres e biológicas executam diferentes funções físicas e biológicas. Trata-se de modelos, biológicas, anatomias e funções totalmente diferentes se compararmos um caso de voo de uma biologia com outra. Ou seja, um voo das abelhas é diferente de um voo do beija flor que é diferente de um voo das águias.

Isso significa que o reino animal é muito mais vasto e complexo que as técnicas e tecnologias que o homem desenvolve. Para cada técnica e tecnologia desenvolvida pelo ser humano há diversas técnicas presentes na natureza.

E não estamos falando apenas de voo, mas também de articulações de caminhada, deslocamento no chão, de funções cognitivas, funções digestivas, acumulação de energia em forma de gordura, comunicação entre as espécies, paladar, alimentação, olfato, cheiro, etc,

Todas estas funções podem ser implementadas em sistemas bióticos e robóticos que imitam a anatomia, a fisiologia e diversos sistemas biomiméticos. Sistemas que imitam a biologia, a anatomia e a fisiologia de diferentes máquinas. Sendo que o exercício que estamos estudando nesta tese se refere somente ao voo das abelhas.

Devemos lembrar que uma cadeira de engenharia biótica é extremamente rica e pode não somente ser estudada em modelos de pós-graduação, mas também em cadeira de graduação que possa vir a ser implementada em diversas escolas de engenharia do Brasil e do mundo.

Assim, pode-se estudar em diferentes disciplinas da cadeira de engenharia biótica, diferentes modelos e funções biológicos de diferentes classes de seres, por exemplo: insetos, répteis, anfíbios, peixes, aves e mamíferos. E em cadeiras específicas de pós-graduação pode-se realizar uma especialização em cada uma destas classes, como nessa nossa tese estudamos a classe dos insetos, mais especificamente os sistemas bióticos das abelhas.

Para se estudar um sistema de voo das abelhas, deve-se estudar e pesquisar o projeto morfológico tais como as asas exteriores, as asas posteriores, o tórax, a cabeça, o ferrão, as antenas, e as patas; deve-se implementar o par de asas exteriores para voo VTOL e voo pairado, o par de

asas posteriores para voo frontal ou guinado; deve-se implementar a cabeça, o tórax, e o ferrão, todos para esconder e ocultar o chip de processamento de máquina de estado e a bateria para abastecimento de energia; deve-se implementar as patas articuladas em 3 partes para execução de pouso e decolagem a contento; e deve-se também implementar o par de antenas para comunicação eletromagnética com a Base e com outras aeronaves MAV.

Ou seja, todo e qualquer sistema biótico de voo ou de outras funções biológicas a serem estudadas partem de um conjunto de funções biológicas e anatômicas que produzem diferentes efeitos bióticos. Todos a serem estudados e pesquisados com a devida atenção e cuidado no setor de engenharia que venha a acompanhar estas condições bióticas.

6.1.1. Morfologia Estrutural Adaptativa

6.1.1.1. Superfície Estrutural Adaptativa Multifuncional

Assim como a abelha possui asas e a aranha não, cada forma morfológica possui uma estrutura adaptada para exercer uma atuação multifuncional pela sua estrutura. Ao se estudar a estrutura adaptativa morfológica pode-se compreender a dinâmica de vida fisiológica e anatômica de cada ser biótico, ou seja, não é aleatório o fato das abelhas possuírem asas, pois elas jamais conseguiriam produzir mel em sua colmeia se não fossem capazes de voar até as diferentes floradas.

Ou seja, cada modelo anatômico e fisiológico desenvolvido por cada família de seres, sejam eles pássaros, peixes, répteis, anfíbios ou mamíferos, estes desenvolveram princípios e funções biológicas de maneira que sua estrutura morfológica realizou adaptação biológica anatômica e fisiológica capaz a exercer bem e de forma a sobreviver dentro de uma fauna complexa e perigosa.

Isto significa que somente através do desenvolvimento de funções estruturais, morfológicas e adaptativas que os diferentes seres e biológicas que os animais de diferentes famílias conseguira sobreviver de maneira adequada. No caso das abelhas, a principal diferença que existe em relação a outras biológicas é o fato de as abelhas exercerem um modelo de vida coletivo e cooperativo.

Muito provavelmente se as abelhas fossem seres não coletivos, mas sim individuais seria bem capaz que elas não sobrevivessem ao mundo externo agressivo e hostil. Isto vale para diversos

animais que vivem juntos e de forma coletiva, por exemplo: pinguins, leões, búfalos, somente para citar alguns.

Esta inteligência coletiva que é observada nos diferentes animais permite que sua capacidade de sobrevivência seja aumentada do que se eles vivessem solitários. No entanto há animais que vive de forma solitária como por exemplo às águias, os tubarões, os beija-flores, somente para citar um ou outro.

A morfologia estrutural adaptativa altera o formato, a anatomia, a fisiologia, o esqueleto ósseo, os tecidos externos e internos, o tórax, as patas, a cabeça, ou seja, toda a forma mórfica que se torna adaptada para exercer diferentes funções de sobrevivência no reino.

É interessante notar que a mudança da forma de uma para outra espécie exige que esta realize e desenvolva diferentes estruturas e diferentes adaptações para execução de suas funções motoras opere de maneira satisfatória para a correta sobrevivência.

No caso das abelhas é interessante notar a formação de 2 pares de asas que operam de maneira distinta. Um par exterior e um par posterior. É interessante observar que isto não ocorre com outros animais, onde apenas um par de asas executa tanto a função de voo vertical quanto a função de voo frontal.

Esta formação de 2 pares de asas pode ser observada em uma estrutura morfológica adaptativa que não se manifesta em outros animais. Por que será que as abelhas desenvolveram dois pares de asas e não apenas um par como no caso dos diversos e diferentes animais?!!

Esta é uma pergunta bem interessante, pois quase que todos os animais voadores, incluindo aves e insetos desenvolveram apenas um par de asas, no entanto as abelhas desenvolveram dois pares.

Talvez possa explicar este processo de criação e desenvolvimento de 2 pares de asas como

um processo de evolução adaptativa para animais pequenos, principalmente insetos, pois asas de grande porte permitem serem aplicadas para voo vertical e voo horizontal.

No caso das abelhas, se estas tivessem desenvolvido apenas um par de asas e não dois, estas seriam necessárias aplicar parte delas ao voo vertical e parte ao voo horizontal e talvez esta adaptação não seria suficiente para realizar o tipo de voo vertical e diagonal de as abelhas executam.

6.1.2. Controle Micro-Aéreo Adaptativo

6.1.2.1 Controle de Campo de Fluxo Global

A capacidade da abelha de voar não se limita ao fato de em sua morfologia existir um par de asas, mas também e fundamentalmente, porque as abelhas conseguiram desenvolver e adaptar uma característica de controle de voo micro-aéreo. Se as abelhas tivessem asas, mas não tivessem um controle adaptativo que orienta suas asas e seu voo, jamais as abelhas conseguiriam cumprir sua missão em produzir mel.

Comentado [V3]: i

Desta forma, as abelhas desenvolveram um sistema de controle de voo que se tornou adaptativo de uma maneira micro e aéreo, ou seja, as abelhas realizam um voo de pequenas distâncias mas com princípios completos e adaptativos.

Comentado [V4]: e

Estas capacidades de adaptar voo de pequenas distâncias, mas muito eficientes pois realizam suas funções de buscar pólen é bastante inteligente. E totalmente adaptada para colheita de pólen e criação do mel na colmeia.

Comentado [V5]: it

Ou seja, as abelhas desenvolveram um sistema de voo adaptativo que permitem voar pequenas distâncias, localizar a florada desejada, realizar a colheita do pólen e voar de volta para a colmeia e produzir o mel.

Esta adaptação de voo micro-aéreo (pequenas distâncias) para realizar a colheita do

pólen em floradas próximas da colmeia e retorno para depositar o pólen na colmeia e produzir o mel somente seria possível graças a capacidade adaptada de voo para pequenas distâncias.

Esta operação de curtas distâncias das abelhas também deve ser trabalhada nas aeronaves MAV, pois deve-se controlar suas distâncias em relação a Base. A MAV deve sempre voar e navegar para voos próximos da Base, para que a comunicação entre as duas opere o tempo todo de maneira a contento. Se a MAV se afastar muito da Base, corre o risco de perder o contato eletromagnético entre as duas. A comunicação entre as duas é fundamental para que a missão e a estratégia sejam mantidas de maneira a contento.

Assim, da mesma maneira que a abelha deve realizar voos próximos à colmeia, as aeronaves MAV devem realizar voos próximos a Base. Os voos micro-aéreos representam voos de pequenas distâncias e o modelo de controle dos mesmos é adaptado para 4 variáveis de controle: frequência, raio de extensão da asa, corda média e coeficiente de arrasto.

O controle de voo das aeronaves MAV baseia-se nestas quatro variáveis de maneira que a alteração da frequência ocorre com a manutenção fixa do raio, da corda e do coeficiente de arrasto para cima e para baixo.

Ou seja, das 4 variáveis de controle, 3 se mantêm fixadas enquanto que a primeira (frequência) se mantêm alterada de forma dinâmica. A frequência média de batimento das asas das abelhas operam entorno de 190 Hz, de forma que aumentando este valor as abelhas realizam voo vertical para cima, ao se abaixar este batimento as abelhas realizam voo vertical para baixo.

Este valor aproximado também se torna eficiente em relação às aeronaves MAV. Ou seja, a força de arrasto para cima é dada pela seguinte fórmula:

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^* b - \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^* b * c_d + \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 S_h * c_l$$

onde:

Farr = força de arrasto

rho = densidade do ar

w = velocidade angular de batimento da asa

$$w = 2\pi f$$

f = frequência de batimento

R = raio de extensão da asa

b = corda média da asa

Sh = área da asa posterior

cd = coeficiente de arrasto

Mantendo-se o raio, a corda média e o coeficiente de arrasto com intensidade constante, varia-se somente a frequência; e ao se variar a frequência varia-se a força de arrasto. Uma segunda opção que existe é manter a frequência, a corda média e o coeficiente de arrasto fixados e variar-se o raio de extensão para cima e para baixo, de forma a gerar uma força de arrasto resultante para cima.

Esta alteração da frequência ou do raio de extensão da asa permite realizar o controle de voo, tanto das abelhas como das aeronaves MAV. É interessante que a aeronave MAV pode e deve exercer um modelo de malha fechada de maneira que a Base realiza e executa o algoritmo de controle de malha fechada e envia para a MAV somente o resultado da saída da constante de amplificação e valor de intensidade que executa a entrada dinâmica na planta.

Ou seja, a aeronave MAV opera com princípios de voo tanto VTOL, quanto pairado, quanto frontal ou guinado baseado no modelo de malha fechada de controle, onde a Base recebe a intensidade de velocidade, de altitude e guinada medida pela MAV, calcula o valor de controle e envia este valor para que a aeronave MAV possa exercer seu voo controlado.

É interessante e fundamental que a aeronave MAV consiga ser capaz de medir a velocidade de voo frontal, a altitude de voo e o ângulo de voo de guinada. Enquanto que a Base deve ser capaz de receber estas informações e calcular o erro em relação a variável desejada, gerar e enviar o valor realizado para amplificação do modelo de controle e executar o controle em malha fechada destas 3 variáveis (velocidade de voo frontal, a altitude de voo e o ângulo de voo de guinada).

6.1.3. Sistemas de Voo Inspirados Biologicamente

6.1.3.1. Aprendendo com a Natureza

Pesquisas que devem ser fomentadas e estimuladas são relacionadas a hipotética área de Engenharia da Natureza. A natureza é rica em soluções de sistemas e de engenharia em todas as suas áreas funcionais, seja dos minerais, da flora e/ou da fauna. Uma cadeira de Engenharia da Natureza se tornaria extremamente rica em conhecimento a ser explorado, estudado, projetado e testado; conhecimento este que pensar em não criar uma cadeira como esta seria um grande equívoco e também prepotência humana. O homem tem muito o que aprender com a natureza e a cadeira de Engenharia da Natureza é simplesmente óbvia.

Há duas opções: Engenharia Biônica ou Engenharia da Natureza. Ambas as duas cadeiras de Engenharia têm como potencial estudar a natureza e suas funções biológicas e imitar estas funções com equipamentos específicos.

Por exemplo, pode-se imitar baleias, tubarões, golfinhos, abelhas, águias, beija-flores, cachorros, gatos, leões, búfalos, plantas, arbustos, árvores, cristais, rochas, enfim uma infinidade de sistemas e seres da fauna, da flora e dos minerais.

Cabe aos diretores de escolas de engenharia perceber a importância de se criar uma cadeira de Engenharia Biônica e/ou de Engenharia da Natureza para que se possa implementar estudos e pesquisas nestas áreas.

Comentado [V6]: p

Uma cadeira nesta ordem tem como fundamento implementar estudos sobre anatomia, fisiologia, constituição óssea, modelos de digestão, tecidos diversos, funções cognitivas, funções cardíacas e respiratórias, enfim, há uma infinidade de áreas e funções que podem e devem vir a serem estudadas pelas cadeiras de Engenharia Biônica e Engenharia da Natureza.

Uma alternativa para implementar estas cadeiras é constituir uma equipe multidisciplinar

de professores das áreas Biológicas e de Exatas. Nos primeiros anos das cadeiras deve-se aplicar equipe multidisciplinar tanto em biologia, como em exatas, e tanto em graduação como em pós-graduação, mestrado e doutorado. A partir da graduação de profissionais de mestrado e doutorado em Engenharia Biônica e Engenharia da Natureza, passa-se a usar estes profissionais para a educação destas cadeiras.

Em relação aos sistemas de voo inspirados biologicamente, pode-se observar a diferença de dinâmica de voo das abelhas, em relação às águias, aos beija-flores, aos condores, aos papagaios, às borboletas, aos gafanhotos, enfim só para citar alguns, há uma enorme diferença de técnicas e de tecnologias biônicas e tecnologias da natureza, nas quais cabe estudar as diferentes formas de asas e formas de voo.

Da mesma forma que se pode estudar e implementar diferentes técnicas de voo implementadas pela natureza, pode-se estudar e copiar as técnicas de voo das abelhas, em relação às águias, aos beija-flores, aos condores, aos papagaios, às borboletas, aos gafanhotos, ou seja, existe um espaço enorme de estudo de biomas para aplicar somente em relação ao voo; imagine aplicar também estes conjunto de seres para as diversas funções como por exemplo: anatomia, fisiologia, constituição óssea, modelos de digestão, tecidos diversos, funções cognitivas, funções cardíacas e respiratórias.

A imitação de diferentes funções em diferentes máquinas que venham a copiar as funções biológicas e as funções da natureza podem vir a criar um universo enorme de equipamentos e máquinas que copiem e/ou imitem a operação e a execução de funções biônicas e da natureza.

Ou seja, sistemas de voo inspirados biologicamente são somente viáveis se viermos a aprender com a natureza; e este aprendizado com a natureza somente se torna viável com a constituição de cadeiras de Engenharia Biônica e de Engenharia da Natureza.

Aprender com a natureza é fundamental para que a evolução de técnicas a evolução e de tecnologias que são extremamente sábias para serem implementadas pelo ser humano através de máquinas, sejam máquinas de voo, ou de qualquer outro tipo de função biológica.

Não há nada mais rico para desenvolvimento de tecnologia do que estudar e aprender com a natureza, para que este estudo e aprendizado venha gerar equipamentos e máquinas que imitem

e/ou copiem o comportamento dinâmico dos biomas de fauna, flora e minerais.

Em termos de universos pequenos como por exemplo o universo das células, dos micro-organismos, dos vírus e das bactérias pode-se operar no desenvolvimento de técnicas biônicas e microscópicas da nanotecnologia. Ou seja, há também um conjunto de estudo, de pesquisa e de implementação de tecnologias não somente nos seres de grande porte, mas também nos seres microscópicos.

Contudo, não iremos dar continuidade a este tema, mesmo porque nossa tese é fundamentada para o voo das abelhas e o voo das aeronaves MAV que imitem as abelhas.

6.1.4.1 Materiais Inteligentes Revolucionários

Ao se pesquisar sistemas bióticos como um todo e no nosso caso sistemas bióticos das abelhas, verifica-se que na natureza existem uma enorme quantidade de materiais inteligentes (materiais com funções e comportamentos específicos) que podem proporcionar uma ou mais revoluções tecnológicas, não somente nas áreas estruturais, mas também em toda e qualquer aplicação desejada para atuação em engenharia de sistemas específicos.

Em relação às asas, estas devem ser capazes de aguentar a torção tanto horário quanto anti-horário. Pode também aguentar a diminuição do comprimento das asas através de uma capacidade de flexão.

Para suportar estas flexões e torções é fundamental que seja aproveitado ou implementado um material plástico para que as aeronaves MAV consigam suportar estas dinâmicas. Isto não somente vale para a torção e a flexão, mas também vale para a fadiga destes movimentos.

A proposta para as aeronaves MAV é utilizar plásticos delrin ou policarbonato, juntamente com uma estrutura esquelética de alumínio com capacidade de flexão, torção e fadiga.

Ou seja, as asas devem possuir dois materiais: um para a constituição do esqueleto e outro para a constituição do tecido da asa dos MAV.

Outro material que deve vir a ser usado opera na estrutura das patas. As patas podem usar estruturas rígidas nos 3 segmentos das patas e deve usar estruturas flexíveis nas articulações das patas. Ou seja, pode-se usar alumínio nas estruturas das patas e utilizar silício piezo-elétrico nas articulações das patas.

A proposta de se utilizar alumínio nas estruturas das patas e nas estruturas fundamenta-se por ser um material mais barato e mais leve quando comparado com outros metais. Não é a toa que a utilização histórica de alumínio é utilizado na indústria da aviação.

Outros materiais podem ser usados para disfarçar a presença das aeronaves MAV para que elas se pareçam com uma abelha verdadeira. É fundamental que a aeronaves MAV possua câmaras de filmar e fotografar; e sensores de radiação; sensores de localização de drogas; e/ou sensores de localização de bombas.

Estes materiais e sistemas sensoriais devem ser extremamente pequenos utilizando-se dentro do possível de nanotecnologia para a construção dos mesmos. Pois estes sensores devem ser capazes de serem escondidos dentro do modelo de disfarce das aeronaves MAV como uma abelha verdadeira.

Os sensores de filmar e fotografar; e sensores de radiação; sensores de localização de drogas; e/ou sensores de localização de bombas devem enviar as informações para a Base em tempo real. Ou seja, a aeronave MAV não realiza qualquer tipo de processamento e identificação, mas sim faz a leitura dos sinais e envia estes sinais procurados para a Base e esta sim realiza processamentos e identificações e a partir destes define uma nova estratégia de voo para as MAV.

Ou seja, as aeronaves MAV fazem a leitura de forma passiva e emite para a Base; e a Base processa estas leituras de forma ativa para definição de novas estratégias de operação.

Assim trabalha-se nas aeronaves MAV equipamentos e materiais inteligentes de forma a

otimizar o voo das mesmas e também comunicar as informações lidas para a Base e esta sim define através de algoritmos de reconhecimento de padrões na nova missão a ser atribuída para as aeronaves MAV.

A utilização de materiais inteligentes tem como foco executar as missões de forma adequada e criar movimentos mecânicos que suportem não somente a investigação de informações, mas também aguentem os movimentos de batimento das asas, flexão e torção dos esqueletos das asas e decolagem e pouso sobre as patas.

6.1.4.2. Materiais Biomiméticos

Materiais que podem imitar funções adaptadas por seres vivos em seu comportamento biológico, também se enquadram em uma área de pesquisa autêntica, onde toda e qualquer função biológica, pode vir a ser imitada por sistemas feitos pelo homem. Assim, imitar o comportamento de determinado material biológico, permite desenvolver um conjunto enorme de aplicações que ainda não foram pensadas pelo homem, ou então foram pensadas, mas não são capazes de ser construídas.

No caso das abelhas, há um conjunto de materiais que podem vir a serem imitados para fabricação de diversas máquinas. Por exemplo, materiais dos esqueletos das asas, materiais dos tecidos das asas, materiais dos esqueletos das patas, materiais das articulações das patas, materiais das antenas, materiais do corpo do tórax, materiais do ferrão, enfim, uma infinidade, só para citar alguns.

Materiais biomiméticos podem ser estudados em todos os animais e plantas: Por exemplo, tecido da pele dos golfinhos e dos tubarões; garras e dentes dos leões; couraça dos hipopótamos; inteligência de comunicação dos papagaios; voo pairado dos beija-flores, etc.

Copiar estes tecidos e materiais biomiméticos opera como uma infinidade de aplicações em diversas áreas de tecnologia e de engenharia.

Ou seja, mais uma vez uma oportunidade de unir Engenharia tradicional com uma cadeira de Engenharia da Natureza que seria de uma enorme diferença. Há uma infinidade de diferentes materiais biomiméticos, contudo eles não devem ser retirados diretamente da natureza, pois isto geraria uma enorme matança de animais, contudo eles podem ser imitados artificialmente para que não haja a matança e ocorra uma função igual pelo material artificialmente fabricado.

Desta forma, materiais artificialmente produzidos que imitem materiais biomiméticos operam de maneira muito adequada, pois não ocorreria a matança de animais e, contudo, ocorreria a aplicação funcional dos materiais para diversas aplicações.

Materiais biomiméticos construídos artificialmente, poderiam imitar o leão, a onça, o tubarão, a baleia, o golfinho, o beija-flor, a águia, o falcão, a formiga, a abelha, enfim todo e qualquer animal e/ou planta que venham a ter um comportamento desejado que imite a função do tecido biológico.

Copiar a natureza foi muito realizada no oriente, principalmente na China e no Japão onde os samurais imitam e imitavam a dinâmica de comportamento dos animais em suas técnicas de artes marciais. Já ocidente do planeta fez muito pouco sobre o comportamento dos mesmos. Cabe assim ao ocidente criar cadeiras funcionais de Engenharia da Natureza para conseguir copiar as vantagens das “tecnologias” dos animais e também por que não dizer das plantas.

A oportunidade de se utilizar tecnologia biomimética pode ser observada nos Jogos Mundiais de Natação, onde foi construído um maiô baseado no tecido de pele de tubarão. Resultado: foram batidos diversos recordes mundiais na natação pois a capacidade de deslocamento hídrica do tecido de tubarão aumentou intensamente velocidade de deslocamento gerando uma infinidade de recordes.

Para compensar esta tecnologia de tecido de tubarão o Comitê Mundial de Natação ordenou que não se poderia mais utilizar estes maiôs especiais e os recordes conseguidos com eles foram todos anulados.

Esta história do maiô de tecido de tubarão é apenas um exemplo sobre o que pode ser construído pelo homem ao se aprender e copiar com a Engenharia de Natureza com materiais biomiméticos.

6.1.4.3. Nanotecnologia

O conjunto de técnicas capazes de construir equipamentos utilizando-se dos recursos de nanotecnologia permitem fornecer para aeronaves MAV uma capacidade de transportar funções de engenharia que sem a utilização destas técnicas, não seria possível. O conjunto de técnicas de nanotecnologia permitem aplicar várias funções nos MAV de maneira a capacitá-los a exercer uma quantidade enorme de atributos e características.

Por exemplo, pode-se instalar nos MAV circuitos construídos com princípios de nanotecnologias que seriam capazes de medir temperatura, medir pressão atmosférica, medir velocidade de voo, medir guinada, realizar filmagem, realizar fotografia, medir radiação eletromagnética, localizar drogas, localizar bombas, enfim, utilizando-se de nanotecnologia, pode-se criar sensores que podem vir a ser instalados nas aeronaves MAV de maneira que estas consigam medir e enviar suas medições para a Base, para que esta resolva tomar decisões específicas e enviar para as MAV uma nova estratégia de voo e de operação.

Este conjunto de sensores poderiam ser instalados dentro do chip de processamento e memória de forma a operar como uma máquina de estado capaz de realizar todas estas medições e enviá-las para a Base, para que esta decida o procedimento futuro.

Ou seja, mais uma vez afirmamos que os MAV não devem operar nenhum algoritmo complexo. Estes devem ser processados na Base. Cabe aos MAV operarem somente a leitura dos sensores e enviá-los em tempo real para que a Base decida o que fazer.

A nanotecnologia permite uma implementação de máquina de estado que se mantém ativa

para ler e receber informações sobre o ambiente exterior das aeronaves MAV. Esta máquina de estado deve ficar operando continuamente através da medição pelos sensores que se tornem capazes de medir temperatura, medir pressão atmosférica, medir umidade, medir velocidade de voo, medir guinada, realizar filmagem, realizar fotografia, medir radiação eletromagnética, localizar drogas, localizar bombas, etc. Ou seja, o chip opera como uma máquina de estado de operação contínua, sem parar e sem mudar de algoritmo a não ser que caiba ao algoritmo da máquina de estado a execução de outras tarefas, previamente já programadas para realizar.

A máquina de estado das aeronaves MAV ficam durante todo o tempo “lendo” as variáveis do ambiente externo para cumprir sua missão de localização de sistemas indesejados. Esta “leitura” opera durante todo o tempo para localizar e fornecer informações de localização realizada para a Base, para que esta possa tomar uma decisão sobre o que fazer no futuro próximo.

Ou seja, dentro do chip, está instalado todos os sensores programados para a operação da máquina de estado e todos os sistemas de comunicação com a base, onde tanto os sensores, quanto o algoritmo da máquina de estado, quanto o sistema de envio e recepção de informações com outras MAV e com a Base; todos estes sistemas são instalados utilizando técnicas de nanotecnologia.

A única forma de se instalar numa aeronave MAV do porte e do tamanho de uma abelha é realizá-la utilizando princípios e técnicas de nanotecnologia e instalá-las dentro de um chip de processamento e memória. Este chip conforme falamos anteriormente deve ser instalado no tórax do corpo da aeronave MAV, disfarçando-o com uma massa e material que imite o tórax da abelha.

Existem outras vantagens para se utilizar nanotecnologia para aplicação de abelhas virtuais; são elas: o volume e o peso. Devemos lembrar que estamos falando de aeronaves MAV do tamanho e volume de uma abelha, portanto, volume e peso são requisitos fundamentais para que a MAV consiga imitar uma abelha verdadeira.

Assim sugiro que todo profissional que vier a estudar e desenvolver uma cadeira de Engenharia da Natureza, que venham a imitar insetos, células, bactérias, vírus, DNA entre outros, exerçam e estudem as técnicas de nanotecnologia.

Somente as técnicas de nanotecnologia conseguem ser instaladas junto com um algoritmo de máquina de estado dentro de um chip de memória e processamento.

6.1.4.4. Otimização de Controles Eletrônicos

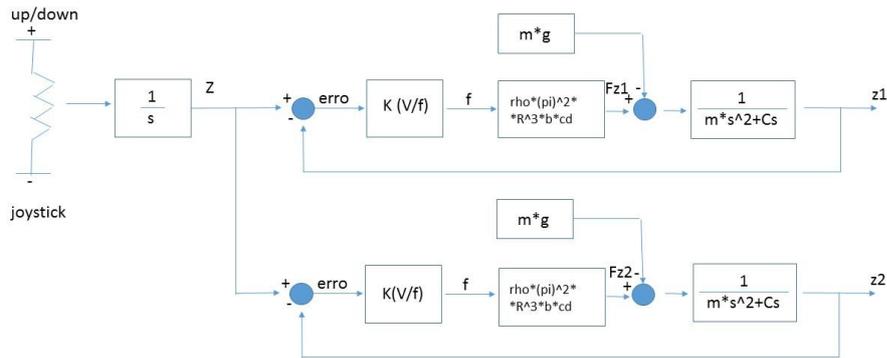
A utilização de controles eletrônicos otimizados permite não somente aplicar equipamentos microeletrônicos, mas também capacitar os MAV a uma navegação e missão com o mínimo de carga transportada. A otimização de controles eletrônicos faz com que a aeronave MAV atue focada na missão para a qual foi designada massificando sua atuação e objetivos.

Os controles de voo das aeronaves MAV podem e devem ser implementados utilizando recursos de nanotecnologia através de controles eletrônicos de voo PID (Proporcional Integral e Derivativo) de maneira que quanto a Base enviar o sinal este sinal foi antes de ser enviados calculado utilizando a técnica de PID.

Esta técnica de voo PID não é calculada pela aeronave MAV, mas sim pela Base e esta envia para a aeronave o valor em tempo real do comportamento de voo que a aeronave deve exercer. Ou seja, através de um modelo de malha fechada e via leitura dos sensores de posição, velocidade e ângulo medido pela bússola, o algoritmo de malha fechada calcula a intensidade de frequência de trabalho de cada asa, sejam elas as asas exteriores e/ou posteriores.

Ou seja, quem calcula a operação PID não é a MAV, mas sim a Base e esta comunica-se com a MAV em tempo real. Desta forma, os controles eletrônicos se tornam efetivos e eficazes. O controle PID é implementado segundo os seguintes sistemas abaixo (segue o controle de voo vertical, o controle de voo guinado e o controle de velocidade e frenagem de voo):

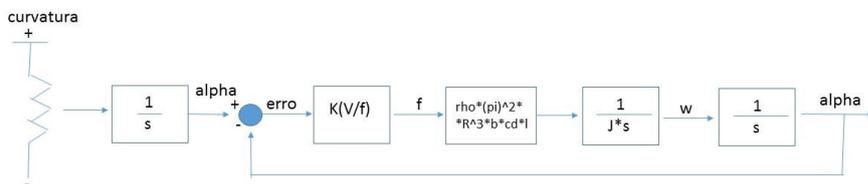
Sistema de Controle para Voo Vertical



Sistema análogo para todos os sensores de altitude: z3, z4, z5, z6, z7, z8, z9, z10, z11, z12

Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

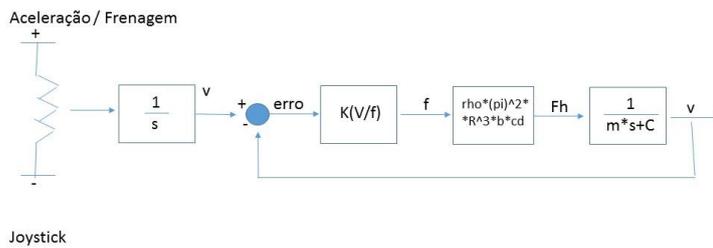
Sistema de Controle de Voo Guinado horário e anti-horário



T

Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

Sistema de Controle de Voo de Velocidade e Frenagem



Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

Assim realiza-se e executa-se tanto o controle de voo vertical, quanto o controle de voo guinado e também o controle de velocidade e frenagem de voo das MAV, em que em todos os casos quem define o valor desejado de controle tanto vertical, quanto guinado e de velocidade é a Base.

6.1.4.5. Controle Retro-alimentado usando Atuadores Piezoelétricos

O batimento e a rotação das asas das abelhas podem ser imitados utilizando-se de atuadores piezoelétricos, que desta forma realizam o voo vertical, horizontal e de guinada. Ao se estudar o modelo de controle retroalimentado que utilizem atuadores piezoelétricos a aeronave MAV pode controlar a dinâmica e a aerodinâmica de seu voo, de maneira a permitir que sua navegação seja realizada conforme desejado.

Portanto um MAV que venha a imitar o voo das abelhas através da aplicação com técnicas de batimento de asas através das articulações piezo-elétricas, onde ocorre o batimento e a torção de maneira a permitir a execução do voo, somente pode se tornar viável com a sincronicidade entre o batimento vertical para cima e para baixo e a torção horária e anti-horária.

Desta forma a aplicação de sinais de controle de retroalimentação em malha fechada permite o uso de frequência para controlar o batimento e a torção para controlar o aumento e/ou a diminuição do coeficiente de arrasto.

O modelo de controle de malha fechada para realizar o movimento desejado, seja de voo VTOL, quanto de voo pairado e/ou de voo frontal ou guinado, é primordial e fundamental para uma aplicação do MAV que imite o voo das abelhas.

Não é possível desenvolver o voo do MAV semelhante ao voo das abelhas sem se utilizar de funções de controle de malha fechada. Malha fechada esta que é fundamental e deve ser capaz de realizar o cálculo e o algoritmo de controle na Base, e esta após a execução do cálculo controle passa a comandar as MAV.

Outro fator fundamental trata-se do atuador piezo-elétrico, pois este sim pode ser montado de forma a constituir uma articulação bem pequena que permita movimentar a asa tanto no batimento quanto na torção.

Ou seja, o sistema piezo-elétrico realiza o batimento e a torção de acordo com o mandatório calculado da Base. Os sistemas piezo-elétricos podem ser bem pequenos permitindo um tamanho e um volume semelhante ao porte geométrico e volumétrico de uma abelha verdadeira.

Desta forma, tem-se um sistema retro-alimentado em malha fechada, calculado na Base, juntamente um atuador piezo-elétrico de comando de voo vertical para cima e para baixo e de torção horária e anti-horária.

Portanto, trabalha-se com a Base emitindo o valor desejado tanto de batimento quanto de torção através de um sinal senoidal ao longo do tempo, que manifesta os dois movimentos.

6.1.4.6. Dinâmica e Controle de Veículos Micro-Aéreos: Ressonância de Flapps

O batimento e a rotação das asas das abelhas permitem que estas realizem seu voo de acordo com a dinâmica e o controle desejado. Contudo, a ressonância de batimento e rotação em conjunto com o batimento e rotação de outras abelhas podem influenciar um comportamento dinâmico de uma abelha em outra ou em várias outras. Quando um conjunto de abelhas voa próxima uma das outras, pode ocorrer uma ressonância; isto nas abelhas é minimizado pois o Número de Reynolds que associa forças de inércia pelas forças viscosas é muito pequeno. Contudo isto deve ser verificado e evitado em aeronaves MAV feitas pelo homem procurando um baixo valor de turbulência provocado por Número de Reynolds elevados.

Em um conjunto de aeronaves MAV que operem segundo dinâmica e controle PID (Proporcional Integral e Derivativo) podem inevitavelmente influenciar o voo de um MAV em outro MAV e isto pode através de um Número de Reynolds alto gerar uma instabilidade no conjunto de aeronaves MAV.

Para evitar esta condição somente há duas soluções: ou afastar o voo de um MAV contra outro MAV, ou tentar minimizar o Número de Reynolds provocado pelo batimento sobre as forças de inércia em relação às forças viscosas.

Deve-se evitar ao máximo a ressonância provocada pelos flaps ou pelo batimento das asas, pois esta ressonância somente pode intervir e prejudicar o comportamento de voo interferindo no modelo PID e consequentemente evitando um voo planejado e desejado.

Uma maneira interessante que pode vir a permitir um voo conjunto tranquilo e estável pode ser realizado através de um planejamento de voo realizado pela Base. Ou seja, a Base planeja e envia uma missão para cada uma das aeronaves MAV de maneira a distanciar cada uma das aeronaves a um posicionamento seguro sem que haja a ressonância de batimento.

Desta forma quem planeja e gera a dinâmica e controle de Veículos Micro-Aéreos não é a MAV, mas sim a Base; e o algoritmo desta deve ser capaz de calcular e emitir para as MAV um voo tranquilo e seguro de maneira a manter distâncias entre elas que sejam suficientes para não executar ressonância das asas.

Portanto o controle PID por si só não é suficiente para manter e executar um voo desejado das MAV; há também a necessidade de se medir e controlar a distância de voo desejada entre diversas aeronaves.

Ou seja, a Base deve inicialmente controlar o PID de cada aeronave MAV; em seguida a Base realiza a simulação do voo com PID em cada aeronave; e após isso a Base checa se a simulação estaria bem sucedida. E somente após a confirmação do sucesso de voo, então este é emitido para as aeronaves MAV. Caso a simulação não seja adequada, a Base realiza outro cálculo de controle de voo e repete a simulação e assim por diante.

Em relação à dinâmica de voo, vale as equações abaixo:

$$F_{arrv} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b - \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b c_d + \frac{1}{2} \rho (w h^2 R h^2) / 4 R h b h c_l$$

$$F_{arrv} - m g = m d^2 z / dt^2$$

$$F_{arrh} = m d^2 x / dt^2$$

F_{arrv} = força de arrasto vertical

F_{arrh} = força de arrasto horizontal

ρ = densidade do ar

$$w = 2 \pi f$$

f = frequência de batimento

w = velocidade angular de batimento

$w h$ = velocidade angular de batimento da asa posterior

R = raio da asa

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Rh = raio da asa horizontal

b = corda média da asa

bh = corda média da asa posterior

cd = coeficiente de arrasto

m = massa da aeronave

g = aceleração da gravidade

d^2z/dt^2 = aceleração vertical

d^2x/dt^2 = aceleração horizontal

Pesquisa inspirada em Micro-Voos Biológicos [7]:

Quando se estabelece um estudo de voo de insetos, mais particularmente o voo das abelhas, tem-se que compreender que o voo de um sistema micro-biológico é completamente diferente de um voo de uma aeronave feita pelo homem, seja de asa fixa, quanto de asa rotativa. O princípio de batimento e rotação co-frequencial que ocorre nas abelhas torna o princípio aerodinâmico totalmente diferente dos princípios tradicionais de asas dos aviões e dos helicópteros. O sistema de batimento e rotação síncrona que ocorre nas abelhas estabelecem uma capacidade de mudança de direção de voo para frente, para trás, para os lados e mesmo para cima ou para baixo uma ação e reação extremamente mais eficaz que as curvas dos sistemas inerciais dos veículos aéreos tradicionais. Somente esta característica já justifica a execução de pesquisas de sistemas de voos micro-biológicos de todos os tipos de insetos, não somente das abelhas.

Ou seja, as abelhas conseguem mudar de direção de forma abrupta sem que as condições inercias de massa e de momento angular venham a criar atrasos no movimento. Um rápido conjunto de batimentos com uma asa e não com a outra, realiza um voo guinado extremamente veloz.

Um batimento síncrono frontal provocado pelo par de asas posterior executa um movimento a frente também muito rápido.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Ou seja, o tempo de resposta ao voo, seja guinado, VTOL, pairado ou frontal é muito curto e pequeno e rápido. Desta forma é fundamental que se realizem pesquisas inspiradas em Micro-Voos Biológicos, pois se trata de um modelo de voo totalmente diferente e inusitado. A aplicação em veículos MAV não seria possível se fosse construído não com batimento e torção, mas sim com asa fixa ou asa rotativa, uma vez que estas duas condições de voo exigem um grande recurso de tamanho. É possível construir helicópteros com 10 cm de raio como brinquedos, mas não é possível construir helicópteros com 1 cm de raio. No entanto é possível construir aeronaves MAV com 1 cm de raio, através de batimento e torção das asas utilizando-se de piezoelectricidade. Desta forma quanto mais pesquisas existirem sobre sistemas micro-biológicos, mais rica será as condições de voo e/ou de dinâmica de movimento de veículos extremamente pequenos que possam vir a imitar insetos, tais como as abelhas através de aeronaves MAV.

Ou seja, o modelo de voo dos insetos, mais particularmente das abelhas permite que através de pesquisas sobre seu comportamento dinâmico, possa vir a ser imitada para capacitar aeronaves MAV a voarem com grande eficiência e eficácia.

Um modelo de voo de asa fixa ou de asa rotativa jamais poderia permitir tamanhos extremamente pequenos como os tamanhos e volumes geométricos dos insetos, mais particularmente falando das abelhas. Nas abelhas estamos falando de um comprimento de 1,5 cm e uma asa de 1 cm cada.

Pesquisas de sistemas biológicos podem vir a enriquecer enormemente equipamentos e tecnologias de todos os tipos. Assim uma hipotética e futura cadeira de Engenharia de Natureza capacita técnicos e cientistas a desenvolverem e implementarem um conjunto enorme de novos experimentos e novas tecnologias, que hoje ainda são desconhecidas e não aplicadas.

Sistemas como o modelo de comunicação entre golfinhos, baleias, leões, elefantes, tigres, ursos, cachorros, gatos, só para citar alguns se trata de modelos extremamente ricos para realizar estudos e pesquisas de todos os tipos e todas as funções fisiológicas e anatômicas imagináveis.

No caso das abelhas estas possuem suas principais atividades em colher pólen e depositar néctar na colmeia para produzir mel. Imaginem uma aeronave MAV que execute estas funções: poderia-se produzir mel artificialmente, com MAV imitando não somente o comportamento

dinâmico das abelhas, mas também imitar as abelhas em suas funções primordiais.

7.1.1. Micro-Aéreo Veículo com asa fixa aeroelástica

Aeronaves MAV que utilizam asa fixa com comportamento aeroelástico, diferentemente das aeronaves MAV que imitam as abelhas, possuem características físicas e aerodinâmicas mais parecidas com aeronaves feitas pelo homem com asa fixa do que com aeronaves MAV que imitam as abelhas. As aeronaves MAV com asa fixa utilizam a asa como veículo de sustentação diferentemente das aeronaves que imitam as abelhas que usam as asas como batimento e rotação de arrasto aerodinâmico. As aeronaves MAV com asa fixa normalmente utilizam propulsão com micro-hélices que juntamente com o comportamento aerodinâmico das asas executam seu movimento na atmosfera.

As aeronaves MAV que imitam as abelhas não operam com asa fixa mesmo que seja asa fixa aeroelástica, O princípio de voo das aeronaves MAV é baseado não em aeroelasticidade, mas sim é baseada em batimento e torção das asas.

As asas aeroelásticas realizam o movimento de extensão e flexão o que altera o raio da asa de forma que o raio aumenta quando a asa empurra o ar para baixo e o raio diminui quando a asa empurra o ar para cima. Ao empurrar o ar para baixo, o ar empurra a aeronave para cima e ao empurrar o ar para cima, o ar empurra a aeronaves para baixo. Ao se realizar os movimentos para cima e para baixo a aeronave MAV realiza um movimento resultante que pode ser VTOL, pairado, frontal ou guinado.

Assim, as asas aeroelásticas possuem um movimento dinâmico diferente das asas das abelhas. As aeronaves MAV podem ser projetadas tanto para realizar o movimento de batimento e torção quanto realizar o movimento de aeroelasticidade.

Em termos práticos ambos os movimentos são eficientes, uma vez que em ambos os casos utilizam-se sistemas piezoelétricos para construir a articulação do esqueleto da asa; utiliza-se de uma estrutura para gerar o movimento dinâmico; e utiliza-se de tecidos para compor as asas.

Em veículos micro-aéreos devido ao seu pequeno tamanho e pequenas dimensões permite-se aplicar asas movimentadas por articulações piezo-elétricas que realizam movimentos de batimento e torção, ou realizam movimentos de aeroelasticidade de extensão e de recolhimento das asas.

Nas aves de grande e médio porte, costuma-se observar mais casos de movimento de asas através da dinâmica de aeroelasticidade, pois as asas das aves são movimentadas através de estrutura óssea tanto de grande quanto de médio porte.

Assim, estamos falando de 2 modelos de operação de asas distintos. Entre eles cito como dito antes o modelo de batimento e torção e o modelo de aeroelasticidade. Sendo que ambos os modelos possuem sua dinâmica de maneira eficaz e eficiente. Em ambos os casos a estrutura física se comporta de maneira a movimentar a estrutura do esqueleto, sendo que este esqueleto executa os movimentos desejados.

Os movimentos de aeroelasticidade e de batimento e torção são capazes de realizar toda uma operação de dinâmica nas asas exteriores como nas asas posteriores das abelhas. Isto pode e deve ser imitado pelas asas exteriores e posteriores das aeronaves MAV.

Onde no caso da dinâmica de aeroelasticidade diminui-se ou aumenta-se o raio da asa e no caso da dinâmica de batimento e torção ocorrem esta dinâmica de movimento. Para aplicar-se na solução de uma aeronave MAV deve-se escolher o equipamento e função que sejam mais econômicas e mais baratas para se manufaturar e operar, uma vez que ambas as soluções são viáveis tecnicamente. Nesta tese estamos dando maior ênfase e atenção para os movimentos de batimento e torção.

7.1.2. Conceito de Asa Flexível

O princípio de asa flexível é totalmente presente nas asas das abelhas. É através do batimento vertical e da rotação longitudinal das asas que estas fletem para cima, para baixo e em torção de forma a proporcionar o comportamento flexível das asas; comportamento este que permite que ocorra um arrasto maior quando a asa se desloca para baixo, e menor que o arrasto quando a asa se desloca para cima; criando um arrasto vertical maior para cima, e um arrasto vertical menor para baixo. O conceito de asa flexível é fundamental para garantir o voo das abelhas. Sem o mesmo, o voo não seria possível.

Ou seja, estamos falando de asas que possuem um comportamento e um conceito de asa flexível: flexível no movimento de batimento para cima e para baixo e flexível no movimento de torção horária quando o batimento estiver em baixo e anti-horária quando o batimento estiver em cima.

Existe também um movimento de asa flexível onde hipoteticamente a asa expande, aumentando o raio quando se movimenta para baixo e se encolhe, diminuindo o raio quando se movimenta para cima.

Em ambos os casos, tanto no batimento-torção das asas, quanto na alteração da dimensão do raio da asa, no movimento de expansão-contração, ocorre uma dinâmica média resultante que cria um empuxo vertical para cima, em voo VTOL, em voo pairado, em voo guinada ou voo frontal.

Desta forma o conceito de asa flexível é muito diferente em relação ao conceito de asa fixa dos aviões ou de asas rotativas dos helicópteros e dos drones (sejam eles birrotores, quadrirotores, hexarotores, octarotores, ou outros, etc).

Em asas flexíveis de grande porte ocorre um grande problema de momento de inércia. As asas de grande porte não conseguem ser flexíveis pelo fato do momento de inércia das mesmas serem muito grande. Já nos insetos e nas aeronaves MAV, como as asas podem e devem ser pequenas, não ocorre este problema de momento inercial. Inevitavelmente as asas flexíveis de

grande porte não suportam este movimento nem de batimento, nem de torção, nem de extensão-contracção.

Mesmo porque nas asas de insetos, pode-se manter frequências de batimento-torção, expansão-contracção em altas. No caso das abelhas estamos falando de frequências em torno de 190 Hz, já no caso das asas flexíveis de grande porte a força de arrasto seria enorme. Uma vez que a força de arrasto é dada segundo as formulações abaixo:

$$F_{arrv} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b - \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b c_d + \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b c_l$$

Ou seja, quanto maior for a frequência de batimento, maior será sua velocidade angular de batimento e maior será sua força de arrasto, seja vertical ou horizontal. A questão que vale para a frequência de batimento ao quadrado, vale também para o raio da asa ao cubo.

Com forças proporcionais à frequência de batimento ao quadrado e proporcionais ao raio da asa ao cubo, faz com que se tornem inviável, pois as forças de arrasto se tornam muito grandes.

Desta forma a única maneira de que se pode trabalhar em asas flexíveis é o fato de elas terem que ser pequenas e flexíveis não em relação à dinâmica vertical, mas sim em relação ao batimento-torção e extensão-contracção.

Isto gera, portanto, limitações em relação à frequência de batimento e em relação ao raio de cada asa, obrigando que isto somente se torne real e viável para insetos de pequeno porte. E para as abelhas e para as aeronaves MAV.

7.1.3. Aerodinâmica Elástica

Este comportamento flexível das asas das abelhas gera um princípio denominado aerodinâmica elástica das asas. As asas ao se fletirem para cima ou para baixo e ao torcerem de forma rotacional no sentido horário e anti-horário criam um comportamento elástico que permite que a diferença de arrasto para cima seja diferente do arrasto para baixo e também permite criar arrasto para frente, para trás e em guinada; arrastos estes todos baseados na articulação das asas na vertical e em rotação e na sua flexão. Sistemas similares podem ser construídos pelo homem utilizando-se de servo-motores com movimento vertical das asas somados a servo-motores com movimento rotacional das mesmas.

Cabe saber que o Impulso vertical para cima deve ser maior que o impulso vertical para baixo, para gerar uma resultante proporcional à aceleração vertical. O mesmo modelo pode ser implementado em aeronaves MAV seja para cima quanto para baixo, como segue:

$$I_{arrv} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^3 b^3 T / 8 - \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^3 b^3 T / 8 + \frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 Rh^3 b^3 T / 8$$

$$I_{arrv} - m \cdot g \cdot T = m \cdot dvv$$

I_{arrv} = impulso vertical resultante

ρ = densidade do ar

w = velocidade angular de batimento

R = raio da asa

b = corda média da asa

T = período de batimento

$$T = 1/f$$

m = massa do sistema seja da abelha quanto da aeronave MAV

dvv = diferencial de velocidade vertical

g = aceleração da gravidade

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

$$I_{arrh} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^3 b^3 T / 8 - \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^3 b^3 T / 8 + - \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R^3 b^3 T / 8$$

$$I_{arrh} = m \cdot dv_h$$

I_{arrh} = impulso horizontal resultante

R_h = raio da asa posterior

w_h = velocidade angular da asa posterior

b_h = corda média da asa posterior

dv_h = diferencial de velocidade horizontal

T = período de batimento das asas

Com estas equações é possível modelar o comportamento das asas que trabalham com princípios de aerodinâmica elástica. Diferentemente do batimento não desejado das asas rotativas de helicópteros e drones e das asas fixas dos aviões, no modelo das abelhas e nos modelos imitados nos MAV o batimento é uma função desejada. Sem o batimento e a torção das asas das abelhas estas não conseguiriam realizar nenhum tipo de voo.

Este conjunto de batimento e torção pode ser observado em vídeos de slow motion das abelhas que demonstram o voo VTOL em decolagem das abelhas. Nestes vídeos cabe a visibilidade do batimento e da torção de forma nítida.

São eles:

Abelha em slow motion

<https://www.youtube.com/watch?v=BSXLrjX41Wg>

Abelha voando ultra slow

<https://www.youtube.com/watch?v=BDIU0oSKKQM>

Voo ultra slow de insetos

<http://www.ultraslo.com/insects>

7.1.4. Controle e Estabilidade

Os princípios de controle e estabilidade das aeronaves MAV que venham a imitar o voo das abelhas é fundamentado pela frequência e amplitude de batimento e rotação das asas em comparação com seu tamanho e peso. Para se garantir que as aeronaves MAV sejam estáveis é necessário construir modelos matemáticos que demonstrem que o arrasto vertical de descida não desequilibra a aeronave em relação ao arrasto vertical de subida e que o arrasto rotacional da aeronave também não a desequilibra em relação a rotação de retorno. É fundamental que a composição destes 4 tipos de arrasto mantenha a aeronave MAV em equilíbrio em voo estável. As variáveis de controle são a frequência e a amplitude. Quanto maior a frequência, maior serão as forças vertical, de empuxo, de guinada e de rotação; e também quanto maior a amplitude, maior serão as forças de empuxo horizontal e de guinada.

Assim temos 4 variáveis que podem ser aplicadas para controle das aeronaves MAV. São elas: frequência de batimento, extensão do raio, corda média da asa e valor do coeficiente de arrasto (que se altera no batimento de subida em relação ao batimento de descida).

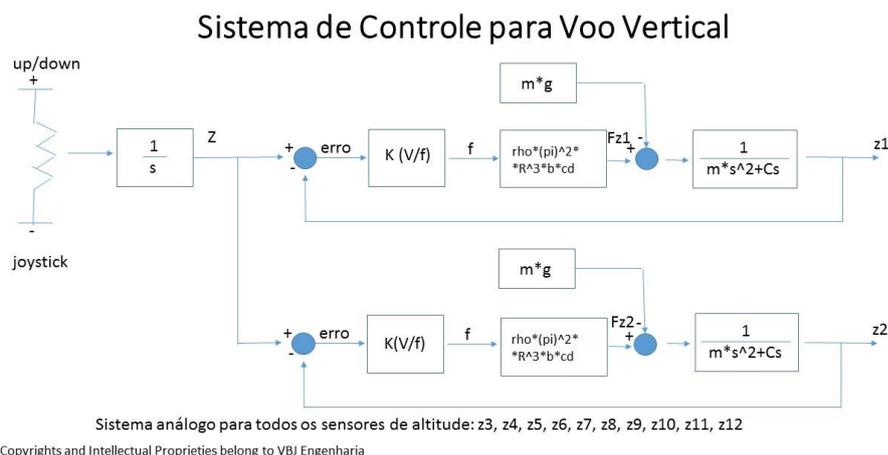
Desta forma os batimentos de subida e descida alteram-se em relação a uns com os outros, a corda média depende apenas das dimensões das asas, a extensão do raio pode ser variada para mais longa ou mais curta e a frequência de batimento opera em relação e em torno de 190 Hz.

Assim estamos falando de 4 variáveis que podem ou não interferir no controle e na estabilidade de voo de uma abelha ou de uma aeronave MAV. A forma mais simples de se manter o controle de uma aeronave MAV é deixar o raio, a corda e os coeficientes de arrasto para cima e para baixo com valores fixos. E executar a variação somente da frequência de batimento ligeiramente maior ou ligeiramente menor que 190 Hz.

É interessante notar que a frequência de batimento considera a equação de controle em função do aumento ou diminuição do erro de altura através de uma constante de alteração de voltagem que pode e deve ser modificada por uma constante de frequência de batimento e esta frequência de batimento deve ser alterada para cima e para baixo executa o voo vertical seja

VTOL, pairado, frontal ou guinado. Ou seja, deve fazer parte do sistema de controle e de estabilidade, um modelo matemático presente na Base que realiza a alteração de altura desejada, em relação a voltagem provocada pelo erro de altura desejada contra altura medida e real; e a saída deste erro de controle deve ser aplicada para alterar voltagem de erro contra frequência de batimento e esta frequência deve ser informada para a aplicação da frequência de batimento.

Isto pode ser observado no modelo de controle e de estabilidade vertical a seguir:



Ou seja, o Joystick comanda a velocidade de subida e/ou descida, a altitude desejada é comparada com a altitude medida e real; a constante $K(V/f)$ altera erro de subida com frequência de batimento e esta gera uma força vertical que quando comprada com o peso gera uma força vertical e consequentemente gera uma aceleração vertical e uma altitude real. O fato de utilizarmos muitas variáveis de altitude ocorre graças ao fato de que o sistema deve e precisa ser estabilizado horizontalmente.

7.1.5. Ressonância Baseada em Micro-Aéreo Veículo Flapeado (em batimento)

O princípio de voo das abelhas, baseado em batimento e rotação de suas asas geram uma frequência de vibração das asas. Veículos MAV que se utilizem deste tipo de tecnologia, precisam prever que o comportamento e a resistência de seus componentes mecânicos e eletrônicos precisam suportar a ocorrência desta ressonância de batimento, ressonância esta, associada a frequência de vibração e oscilação.

A princípio a frequência de batimento opera em torno de 190 Hz, que se trata de uma frequência audível, uma vez que a frequência sonora opera entre 20 Hz e 20KHz. Como a frequência opera na faixa audível, o batimento e a torção geram juntos uma ressonância sobre o corpo da aeronave MAV.

Esta frequência sobre o corpo da aeronave MAV gera uma ressonância sobre o corpo da aeronave. Ou seja, tanto a aeronave MAV que gera a ressonância quanto as aeronaves MAV que estão próximas umas das outras recebem a vibração e a ressonância de cada aeronave.

Ou seja, o batimento e o movimento de flap de uma aeronave influencia as outras aeronaves que estejam próximas. Quanto mais próximas, maior a influência das aeronaves umas das outras. O movimento de flap gera a ressonância e interfere no voo de cada aeronave próxima.

Desta forma, o batimento de uma asa sobre o ar, gera uma onda de movimento dinâmico e esta onda se propaga pelo ar e atinge o corpo de outra aeronave, gerando sobre ela uma dinâmica de ressonância de voo mecânica.

Esta ressonância interfere na qualidade de voo da aeronave que recebe o batimento de ressonância. Isto exige uma distância mínima entre uma aeronave MAV e outra aeronave MAV. Com uma distância mínima a influência de ressonância é também mínima e permite uma qualidade de voo satisfatória. Como as asas são pequenas, estas geram ressonâncias leves o que permite que havendo uma ressonância mínima estas se tornam pequenas e pouco influentes.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

O batimento das asas gera uma exponencial negativa que faz com que a influência de uma asa de uma MAV atinja sobre outra MAV decaia desta maneira, gerando uma condição mínima de voo adequado. Felizmente trata-se de uma exponencial negativa, pois desta maneira com uma distância mínima a influência também se torna mínima.

Ou seja, quanto maior for a distância entre uma aeronave e outra, menor será sua atuação de maneira exponencial. Exponencial esta que se manifesta de forma negativa, rapidamente caindo para próxima de zero.

E o fato de asas serem pequenas ou micro dimensionadas, faz com que o batimento das asas gera também uma capacidade mínima de influência sobre outras asas e outras aeronaves. Deve-se lembrar que o batimento é proporcional à força de arrasto para baixo e para cima, e/ou para frente e para trás e é também proporcional ao raio ao cubo e proporcional à corda média.

Quanto maior for o raio da asa, maior será a sua força de arrasto sobre o ar ao cubo. E quanto maior for a corda média, também maior será sua força de arrasto. Além disso, quanto maior for a frequência de batimento, maior será sua força de arrasto sobre o ar ao quadrado. E há também o coeficiente de arrasto para cima e o coeficiente de arrasto para baixo.

Comentado [VBJ7]:

Ou seja, estamos falando de 5 variáveis que interferem no voo e na ressonância de voo de outras aeronaves MAV e também no voo das abelhas. São elas: frequência ao quadrado, raio ao cubo, corda e coeficiente de arrasto para cima e coeficiente de arrasto para baixo.

Estas cinco variáveis alteram a qualidade de voo e o empuxo sobre o ar e conseqüentemente modificam o pulso do ar e em sua ressonância, de maneira a causar vibração tanto em outras aeronaves MAV, quanto em suas asas e corpos.

7.1.6. Conceito Estrutural para Asas Flexíveis

As asas flexíveis das abelhas, possuem um tipo de esqueleto flexível longitudinal e radial sob a superfície das asas. Este esqueleto flete para cima, para baixo e em rotação de acordo com o comportamento dinâmico das asas. Esta estrutura esquelética permite que as asas venham a flitir sem quebrar e desta forma são um modelo fundamental na construção de asas de veículos MAV similares que venham a imitar o voo das abelhas. Veículos MAV que imitem o voo das abelhas precisam possuir uma estrutura física e flexível similar ao das asas das abelhas. Sem esta capacidade de fletir, o voo imitado das abelhas se torna bastante ineficaz.

Portanto, as asas possuem um esqueleto de 3 partes fixas e 3 articulações dinâmicas. Através destas 3 articulações as asas das abelhas executam um movimento que permite a elas pousarem, decolarem e andarem sobre qualquer superfície inclinada ou não. Se imitarmos esta biotecnologia, temos 3 partes fixas e 3 articulações piezo-elétricas.

Através desta flexão executada pelas 3 articulações piezo-elétricas os MAV podem não somente decolar e pousar na vertical (voo VTOL) como também pode andar em qualquer tipo de superfície.

Estamos então falando de 18 articulações para pouso VTOL (3 a diante a esquerda, 3 a diante a direita, 3 ao meio a esquerda, 3 ao meio a direita, 3 ao fundo a esquerda, 3 ao fundo a direita,

E também existem nas abelhas 18 estruturas rígidas que formam 9 partes a esquerda e 9 partes a direita. Cada uma das 9 estruturas forma 3 partes a diante, 3 partes ao meio e 3 partes ao fundo.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Contudo é fundamental perceber que as asas das abelhas e também das aeronaves MAV possuem não somente um tecido flexível que cobre a asa, pois também possui um esqueleto que se abre como uma folha de uma árvore apresentando não somente o tecido, mas também um esqueleto flexível formado por uma estrutura rígida e uma estrutura flexível ao mesmo tempo.

Esta estrutura da asa permite que ela seja ao mesmo tempo rígida e ao mesmo tempo flexível de maneira que tanto as abelhas quanto as aeronaves MAV exerçam um movimento de voo para todas as direções, para voo VTOL, para voo pairado, para voo frontal e para voo guinado.

Sem esta estrutura rígida e flexível ao mesmo tempo nem as abelhas nem as aeronaves MAV poderiam exercer tamanha flexibilidade no voo. É importante lembrar que as abelhas não possuem apenas um par de asas flexíveis, mas sim dois pares de asas flexíveis (um par exterior e um par posterior). Em que o par exterior gera o voo VTOL e pairado e o par posterior gera o voo frontal e guinado.

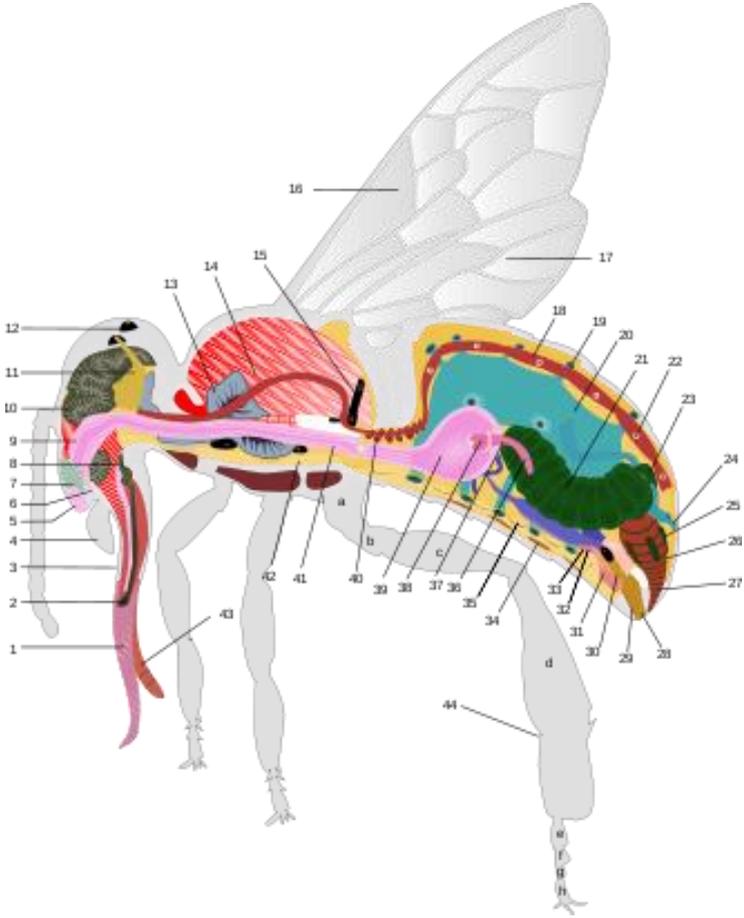
O esqueleto das asas das abelhas pode e deve ser imitado por uma estrutura de asa de uma aeronave MAV. A final de contas trata-se de uma biotecnologia mais que consagrada e eficaz.

Ou seja, cabe implementar nas aeronaves MAV um esqueleto em parte rígido; em parte flexível; esta parte piezo-elétrico; e em parte têxtil (utilizando um tecido em malha ou através de um plástico flexível).

Esta composição de rigidez, flexibilidade e textura forma um componente vital, eficiente e eficaz para ser implementadas nas aeronaves MAV ao se imitar a estrutura de asa das abelhas.

Você pode observar o esqueleto das asas da abelha na imagem abaixo, onde se observa a presença do esqueleto rígido, flexível e têxtil:

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”



7.1.7. Geração de Vibração causado pelo Movimento em Flap

O movimento de flap (batimento) em dinâmica de frequência gera inevitavelmente o comportamento de vibração das asas, do esqueleto aerodinâmico, do corpo e da estrutura do veículo MAV. Assim, uma aeronave MAV deve ser projetada, fabricada e testada para que todas as suas partes físicas possam suportar a frequência de vibração do movimento causado pela oscilação das asas tanto em batimento, quanto em rotação.

O esqueleto, as asas e a estrutura devem ser capaz de suportar o comportamento da vibração. Ou seja, estes devem representar na aeronave MAV um sistema passa baixa, a seguir, de 190 Hz. Portanto o esqueleto, as asas e a estrutura devem ter como atenuação no máximo esta frequência de vibração.

Com este valor de atenuação de vibração causada pelo movimento de flap das asas, toda estrutura é capaz de suportar uma vez que a vibração é minimizada a partir da frequência de ressonância. Assim é interessante ter uma frequência de ressonância entre 50 e 100 Hz.

Esta capacidade de trabalhar com o sistema passa baixa através das frequências de corte e ressonância a cima, permite que a vibração seja bastante atenuada quando a asa opera em 190 Hz, que é a frequência de operação das abelhas.

O modelo massa-mola tradicional sistemas de controle de segunda ordem exemplifica o Modelo de Ressonância da estrutura das abelhas, como segue:

$$m \cdot d^2x/dt^2 = F_{arrh} - mg$$

$$F_{arrh} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot R \cdot b \cdot c_l + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot R \cdot b \cdot h - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot R \cdot b \cdot h \cdot c_d$$

Onde

m = massa do sistema

d^2x/dt^2 = aceleração horizontal

F_{arrh} = força de arrasto horizontal

ρ = densidade do ar

g = aceleração da gravidade

x = deslocamento horizontal

w = velocidade angular da asa

R = raio da asa

b = corda média da asa

A Geração de Vibração causado pelo Movimento em Flap é inevitável e a única forma de amenizar a operação e a vibração sobre a estrutura e sobre o corpo é construir as estruturas físicas incluindo baterias, chip com máquina de estado programada, e antenas de comunicação. Não existe nenhuma outra forma para que a vibração causada pelo movimento de flap das asas venha a prejudicar a qualidade de voo das aeronaves MAV.

Um filtro passa baixa sobre a construção das estruturas das aeronaves MAV, permite que estas aeronaves operem de forma satisfatória sem a ocorrência de vibração indesejada. A única vibração que existe é a vibração de batimento e flap das asas.

Cabe dizer que as aeronaves MAV são de construção artificial e devem imitar o voo das abelhas utilizando-se de sistemas artificiais e piezo-elétricos.

Ou seja, o modelo de vibração do filtro passa baixa é consequência do modelo de articulação piezo-elétrica que exerce um princípio de dinâmica massa-mola.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_{arrh} - C \frac{dx}{dt}$$

$$x = \frac{F_{arrh}}{(m \cdot s^2 + C \cdot s)}$$

$$p_{olo} = -C/m$$

Conceitos de Mecanização e Controle para Micro-Veículos Aéreos imitados Biologicamente [8]:

Os princípios biológicos de controle de voo e de mecânica de voo inspirados pela biologia das abelhas, geram um conjunto de pesquisa e de estudo enorme, principalmente quando se refere a mecânica e controle de comportamento aéreo. Isto posto, sabe-se que o modelo de voo das abelhas é diferente do modelo de voo dos aviões, dos helicópteros, dos foguetes e de outros veículos de asa fixa e rotativa. Sistemas MAV de voo baseados em abelhas geram um cabedal enorme de conhecimento e de técnicas capazes de não somente gerar novos conhecimentos, mas também criar uma revolução física e matemática nos modelos aerodinâmicos compreendidos e aplicados pelo homem.

Trata-se de um modelo de voo totalmente diferente dos tradicionais sistemas de asa fixa e de asa rotativa. O princípio de voo das abelhas é fundamentado em batimento para baixo e para cima das asas e torção horária e anti-horária das asas.

Assim, fundamenta-se em um modelo matemático e físico totalmente diferente dos aviões, dos helicópteros e dos drones tradicionais. Em todos estes casos as asas operam ou de forma fixa ou de forma rotativa, que difere totalmente do voo das abelhas e dos MAV.

Tanto no caso das aeronaves de asas fixas e asas rotativas gera-se um princípio onde ocorre:

$$L = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 S + \frac{1}{2} \rho (wh^2 Rh^2) / 4 Sh cl$$

De forma que

L = força de sustentação

ρ = densidade do ar

w = velocidade angular da asa

wh = velocidade angular da asa posterior

S = área da asa

Sh = área da asa posterior

cl = coeficiente de sustentação

Enquanto que no caso de asa das abelhas e das MAV ocorre a diferença de impulso em relação a 3/8 do período para baixo; 1/8 do período em torção horária; 3/8 do período para cima; e 1/8 do período em torção anti-horária.

De maneira que no impulso para baixo trabalha-se com coeficiente de arrasto para baixo, enquanto que no impulso para cima, trabalha-se com coeficiente de arrasto para cima. Onde o coeficiente de arrasto para baixo é muito maior que o coeficiente de arrasto para cima e em ambos os casos devem ser medidos por túneis de vento.

Desta maneira pode-se calcular a dinâmica de voo vertical segundo as equações abaixo:

$$m \cdot \frac{dz^2}{dt^2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot S - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot S \cdot c_d + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w_h^2 \cdot R_h^2) / 4 \cdot S_h \cdot c_l - m \cdot g$$

onde:

m = massa da abelha ou do MAV

$\frac{dz^2}{dt^2}$ = aceleração vertical

g = aceleração da gravidade

O sistema de controle de voo vertical é fundamentado por uma velocidade desejada calculada e definida pela Base. Esta velocidade calculada pela Base ao longo do tempo define e gera uma velocidade desejada e esta velocidade definida é enviada para as aeronaves MAV de forma que as aeronaves possam executar o comportamento dinâmico de posição, velocidade e aceleração a serem implementados pelas aeronaves MAV.

Ou seja, as aeronaves MAV vêm a realizar o movimento e a dinâmica de posição, de velocidade e de aceleração tanto na velocidade vertical (VTOL e pairado), quanto na velocidade horizontal e de guinada.

Voo 3D Pairado de Inseto [10]:

A modelagem matemática de voo pairado de insetos, mais especificamente, voo pairado de abelhas, pode ser analisada como um modelo em equilíbrio dinâmico, onde a força peso da abelha é igual a força de arrasto média na vertical para cima.

Ou seja, o arrasto médio provocado pelo ciclo de batimento vertical para cima, se equilibra com a força peso que impulsiona a abelha para baixo. O impulso vertical de arrasto para cima, menos o impulso vertical de arrasto para baixo, deve ser igual ao impulso vertical da força peso para baixo. Desta forma ocorre o voo pairado das abelhas.

Ou seja, o impulso médio de batimento para cima deve ser equivalente ao peso da abelha como segue:

$$F_{arrvc} \cdot 3 \cdot T / 8 - F_{arrvb} \cdot 3 \cdot T / 8 - m \cdot g \cdot T = m \cdot dv, \text{ onde}$$

$$F_{arrvc} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot R \cdot b \cdot c_{dc}$$

$$F_{arrvb} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) / 4 \cdot R \cdot b \cdot c_{db}$$

F_{arrvc} = força de arrasto vertical para cima

T = período de batimento da asa

F_{arrvb} = força de arrasto vertical para baixo

m = massa do veículo

g = aceleração da gravidade

dv = diferencial de velocidade

ρ = densidade do ar

w = velocidade de rotação

R = raio da asa

b = corda média da asa

c_{dc} = coeficiente de arrasto para cima

c_{db} = coeficiente de arrasto para baixo

Com esta condição tanto as abelhas quanto os insetos conseguem voar para cima e para frente, pairado e guinado de maneira que se atinja o modelo de voo desejado. Tanto as abelhas quanto as aeronaves MAV podem utilizar destes recursos para executar qualquer tipo de voo planejado e desejado.

Ou seja, utilizando-se destes recursos as abelhas e as aeronaves MAV conseguem voar em qualquer direção, para cima e para baixo, além de voo pairado e VTOL.

Para se realizar o voo pairado das abelhas estas executam a seguinte equação de voo:

$$I_{vc} - I_{vb} - I_g = 0$$

$$F_{arrvc} \cdot \frac{3}{8} T - F_{arrvb} \cdot \frac{3}{8} T - m \cdot g \cdot T = 0, \text{ onde}$$

$$F_{arrvc} \cdot \frac{3}{8} T - F_{arrvb} \cdot \frac{3}{8} T = m \cdot g \cdot T$$

I_{arrc} = Impulso de arrasto para cima

I_{arrb} = Impulso de arrasto para baixo

I_g = impulso proporcionado pela gravidade

Com esta condição de voo o impulso de arrasto para cima menos o impulso de arrasto para baixo deve ser igual ao impulso de arrasto da força peso. Observa-se que o impulso de arrasto para cima somente opera durante $\frac{3}{8}$ do tempo e o impulso de arrasto para baixo também somente opera durante $\frac{3}{8}$ do tempo, enquanto que o impulso de arrasto da força peso trabalha durante 100% do tempo.

Observa-se que as forças de arrasto de torção horária e torção anti-horária não são consideradas uma vez que uma anula a outra e não necessitam entrar no cálculo do impulso.

10.1.1. Uma variedade de formas de asas experimentais

A ciência aerodinâmica estuda incessantemente uma infinidade enorme de diferentes tipos de asas. Estes estudos são baseados em asas experimentais de forma a medir os coeficientes de sustentação, coeficiente de arrasto, força de sustentação, força de arrasto, eficiência aerodinâmica, etc.

Estes estudos experimentais são realizados em túneis de vento que permitem compreender e analisar o comportamento dinâmico e aerodinâmico destas diferentes asas. Numa eventual cadeira de Engenharia da Natureza, deve-se propor o estudo de modelos em asas biológicas para verificar a otimização e a melhor eficiência das asas biológicas em determinado tipo de missão, seja biologia micro-aérea, seja biologia de aves maiores.

No caso das asas de aves na grande maioria destas asas ocorrem o batimento do para de asas que aumenta o raio da asa quando ocorre o batimento desta para baixo e ocorre a diminuição do raio das asas quando ocorre o batimento desta para cima. Ou seja, ocorre um batimento resultante do raio para baixo superior ao batimento para cima.

Este movimento dinâmico para baixo maior e para cima menor gera uma sustentação resultante para cima, diferentemente do que ocorre nos beija-flor e também nas asas dos insetos. Nas asas das abelhas, por exemplo ocorre o batimento em conjunto com a torção das asas.

Assim o modelo de voo das asas das aves é bem diferente do modelo de voo das asas dos insetos, mais especificamente das asas das abelhas. A dinâmica das asas dos beija-flores também é bem diferente.

Desta forma no estudo de voo dos sistemas bióticos ocorrem diferentes modelos, onde pode-se observar o voo das águias, diferentemente do voo dos beija-flores, diferentemente do voo das abelhas e diferentemente do voo das borboletas, isto somente para citar 4 casos.

Isto posto nestes 4 casos ocorrem uma variedade de formas de asas experimentais onde surgem uma quantidade enorme de mudanças e formas de voo, contudo se estudássemos um maior número e quantidade de biomas surgem um enorme conjunto e casos de voo em Engenharia da Natureza.

Os diferentes e inúmeros modelos de voo dos insetos e das aves demonstram uma enorme capacidade de voo de diferentes sistemas bióticos que variam desde o voo dos beija-flores até o voo das gaivotas e dos condores.

A diferença de anatomia das aves e dos insetos propõem uma enorme quantidade de voo e de fisiologia de voo, gerando uma enorme variedade de condições de voo e condições de anatomia e fisiologia de voo.

A capacidade de voo está diretamente relacionada com a anatomia dos esqueletos e dos tecidos das asas, isto tanto no caso das aves e também no caso dos insetos. Nos insetos estão construídos uma anatomia de estrutura de esqueletos e tecidos e no caso das aves estes esqueletos e tecidos são maiores. Sendo que no caso das aves o esqueleto diminui e aumenta o raio da asa e no caso dos insetos altera-se a dinâmica das asas através da torção das mesmas.

Pode-se prever que no caso das aves o esqueleto aumenta ou diminui o raio das asas e no caso dos insetos ocorre o aumento ou a diminuição da torção do esqueleto das aves das asas. Isto não ocorre em 100% dos casos, mas sim na maioria dos casos das aves e dos insetos.

Ou seja, no caso das aves, o esqueleto e os tecidos das asas realizam o aumento e a diminuição do raio de forma que o raio aumenta quando a asa se movimenta para baixo e o raio diminui quando a asa se movimenta para cima. E no caso dos insetos, o esqueleto e os tecidos das asas realizam a torção anti-horária antes de descer e realiza a torção horária antes de subir.

Desta forma ocorre a dinâmica de voo para cima e para baixo, sejam das aves quanto dos insetos.

10.1.2. A asa mais bem sucedida durante os testes

O estudo de uma cadeira de Engenharia da Natureza de diferentes tipos de asas na biologia de insetos e de aves permite compreender e analisar a maior e a menor eficiência de cada tipo de asa diante a cada modalidade de voo. Somente em teste de laboratório que imitem abelhas ou outros animais alados pode-se concluir que tipo de asa é mais ou menos eficiente para cada tipo e modalidade de voo. Para voos de águia, asa de águia; para voos de beija-flor, asa de beija-flor; para voos de abelha, asa de abelha; e assim como a natureza permite estudar.

Ou seja, diferentes tipos de asas para diferentes funções e diferentes aves e/ou insetos. Por exemplo as asas das águias realizam voo com asas paradas. No caso das gaivotas, também; já no caso das abelhas e/ou das borboletas asas de abelhas e/ou de borboletas. Em ambos os casos asas com batimento durante todo o tempo, enquanto que no caso das gaivotas e das águias asas fixas durante grande parte do tempo.

Isto significa que diferentes animais usam diferentes tipos de comportamento de asas, entre elas asas fixas e/ou asas de batimento. No caso das asas fixas durante parte do tempo ocorre o batimento com raio menor e depois maior; enquanto que no caso das abelhas e das borboletas executa-se o batimento junto com a torção durante todo o tempo.

Isto posto, percebe-se que o tipo de asa que é mais bem sucedida para diferentes condições e diferentes testes de aeronaves MAV. Uma aeronave MAV que tenha as dimensões de pomba, de gaivota de águia ou de condor usam asas fixas com batimento curto, enquanto que nas abelhas, nos zangões, nas borboletas, nos marimbondos ocorrem o batimento com torção durante todo o tempo.

Isto mostra que diferentes dimensões e pesos de aeronaves exigem diferentes tipos e qualidades de asas, seja elas com batimento e torção e com batimento e fixas. Com a realização de voo guinado, também se estabelece as duas condições, onde apenas uma das asas executa o

batimento e a torção e o batimento fixo.

Desta forma, demonstra-se facilmente que uma teoria hipotética de Engenharia da Natureza permite a compreensão, o estudo, a pesquisa e o desenvolvimento de Ciência Humana capaz de imitar os Sistema Bióticos.

A cadeira de estudo de Engenharia da Natureza permite a compreensão e o estudo de sistemas biológicos, onde através do aprendizado de ciências biológicas.

Pode-se e deve-se estudar estruturas de esqueletos, estruturas de tecidos de pele, funções cardíacas, princípios de deslocamento de voo, princípios de deslocamento em terra, pouso e decolagem VTOL, antenas de comunicação, sistemas de alimentação, princípios neurológicos, entre outras funções.

As asas mais bem sucedidas em testes ocorrem de acordo com as diferentes dimensões das aves, e/ou dos insetos. No caso das aves, estas trabalham com características de dimensões superiores e com voo com asas de batimento e fixadas enquanto que no caso dos insetos, estes trabalham com características de dimensões menores e com o voo das asas em batimento e torção sincrônicas.

Estes dois modelos são distintos, mas em ambos os casos podem ser aplicadas, tanto em aeronaves MAV (Micro Air Vehicle) como e em aeronaves SAV (Small Air Vehicle). As aeronaves MAV imitam as abelhas e os insetos, enquanto que as aeronaves SAV imitam as pombas, as gaivotas e as águias.

É importante notar que em ambos os casos se trata de um modelo baseado em parte em batimento e torção e parte em batimento e comportamento fixo. Desta forma, pode-se utilizar a Engenharia da Natureza para que esta seja imitada por sistemas construídos por Ciência Humana. Assim, o ser humano é capaz de imitar a natureza usando-se de diferentes animais, sejam eles aves de médio e grande porte, e/ou de insetos de pequeno porte.

10.1.3. Projeto da Asa

Asas de abelhas possuem uma estrutura de esqueleto flexível e uma camada de cobertura do esqueleto que permite a realização do arrasto. Um veículo MAV que venha a imitar a dinâmica de voo das abelhas, devem possuir um esqueleto permissivo à flexão e à torção, de forma que a deformação do esqueleto não rompa e também não fadigue. Além disso, deve possuir uma camada de tecido que realize a união do esqueleto de forma a permitir a eficiência do arrasto da asa, seja vertical, horizontal ou em guinada. Assim o projeto da asa de um MAV que imite as abelhas compõe-se destas duas estruturas: esqueleto flexível e tecido de arrasto.

Ou seja, uma aeronave MAV deve ser capaz de manter um esqueleto com articulação piezo-elétrica que realiza o movimento de batimento e torção e também deve ser capaz de utilizar um tecido flexível que realiza o arrasto, seja VTOL, pairado, frontal ou guinado.

Desta forma, as aeronaves MAV, assim como seu esqueleto e seu tecido devem ser capazes de utilizar estas duas estruturas de maneira a criar o empuxo, seja vertical ou frontal. No tecido de voo das asas exteriores, através do esqueleto e asas exteriores executam o voo pairado e o voo VTOL, enquanto que no tecido de voo das asas posteriores estes executam o voo frontal e o voo guinado.

Assim, as aeronaves MAV conseguem imitar o voo das abelhas através do movimento continuado de batimento e torção das asas que executam em conjunto o voo das mesmas.

Esta estrutura funcional de batimento e torção somente ocorre em animais e/ou insetos de pequeno porte, pois em aves pequena, médias e/ou maiores a torção não se manifesta como viável, e sim executam um aumento e uma diminuição do raio da asa da ave.

O projeto da asa é baseado nesta composição de esqueleto da mesma e tecido que a cobre. O tecido das asas das abelhas utiliza uma construção parecida com as folhas de uma planta, onde existem e surgem pequenas ranhuras e pequenos fito-esqueletos que mantêm a estrutura da planta.

Assim como as plantas possuem um pequeno esqueleto fitológico possuem também as abelhas um pequeno esqueleto estrutural que constitui a estrutura da planta. Desta forma a planta possui uma estrutura muito similar à estrutura das asas das abelhas, onde sua estrutura possui partes rígidas e partes articuladas e também tecidos flexíveis que cobrem as asas.

O projeto das asas de uma aeronave MAV constitui destes três recursos: esqueleto rígido, esqueleto piezo-elétrico articulado e tecido de cobertura flexível.

O projeto da asa das aeronaves MAV, devem similarmente às asas das abelhas possuírem um par de asas exterior para voo VTOL e pairado, e um par de asas posteriores para voo frontal e guinado.

Um único par de asas não seria capaz de executar os movimentos VTOL e pairado e também os movimentos frontal e guinado. Por isso, existem nas abelhas estes 2 pares de asas (um exterior e um posterior).

Apesar de haver 2 pares de asas, ambos os pares operam de maneira semelhante, onde um par exterior cria o empuxo vertical e um par posterior cria o empuxo horizontal. E em ambos os casos a estrutura de materiais, esqueletos rígidos, esqueletos flexíveis e tecidos são semelhantes.

Trata-se assim de um modelo e de um projeto de asa que se parece mais com a folha de uma planta do que com uma as asas de um avião e ou aeronave de asas rotativas. A asa de uma abelha parece-se muito mais com uma folha de uma planta do que com uma asa de uma aeronave tradicional.

Ou seja, o modelo e o projeto de uma asa de uma aeronave MAV constitui-se por uma capacidade de articulação e empuxo vertical e frontal totalmente diferente do modelo de sustentação e arrasto de uma aeronave de asas rígidas ou de asas rotativas.

10.1.4. Construção da Asa

Um veículo MAV que utiliza um princípio de asa semelhante ao das abelhas deve ser construído utilizando-se de materiais compatíveis com flexão e torção e que suportem rupturas e fadigas. Este esqueleto pode ser fabricado utilizando-se de impressoras 3D com plásticos especiais de engenharia.

Este esqueleto se parece bastante com uma estrutura vegetal de uma folha de árvores, onde surgem um esqueleto central e em seguida surgem ramificações do esqueleto. O tecido que cobre o esqueleto e que permite a realização do arrasto pode ser construído com uma malha têxtil. Em seguida cola-se a malha têxtil na estrutura do esqueleto. Em seguida, montam-se na articulação os servo-motores ou os sistemas piezoelétricos, sendo um sistema para articulação vertical e outro para a articulação rotacional.

Assim, a construção das asas possui duas fases: uma primeira fase para a construção do esqueleto tanto fixo quanto articulado na parte piezo-elétrica e uma segunda fase para a colagem do tecido seja ele têxtil ou plástico.

Desta forma, as asas das aeronaves MAV devem ocupar cerca de 1,0 a 1,5 cm de comprimento e 0,5 cm de corda média. Sendo que a asa retrata um abaulamento circular na sua periferia. E a asa possui duas articulações piezo-elétricas para batimento e torção no par de asas exteriores e também duas articulações piezo-elétricas para batimento e torção no par de asas posteriores.

A construção passa por estas duas fases: na primeira fase constrói-se o esqueleto rígido e flexível e na segunda fase constrói-se o tecido que cobre a asa. Este tecido pode ser fixado no esqueleto através de colas tradicionais de aviação.

Como se trata de 2 pares de asas, a montagem pode ser feita inicialmente para a construção dos esqueletos de pares de asas e em seguida realiza-se a colagem do tecido exterior. A construção pode ser executada utilizando-se de lentes de aumento para melhor visualizar a montagem e pinças mecânicas e pequenas para manipular a construção do

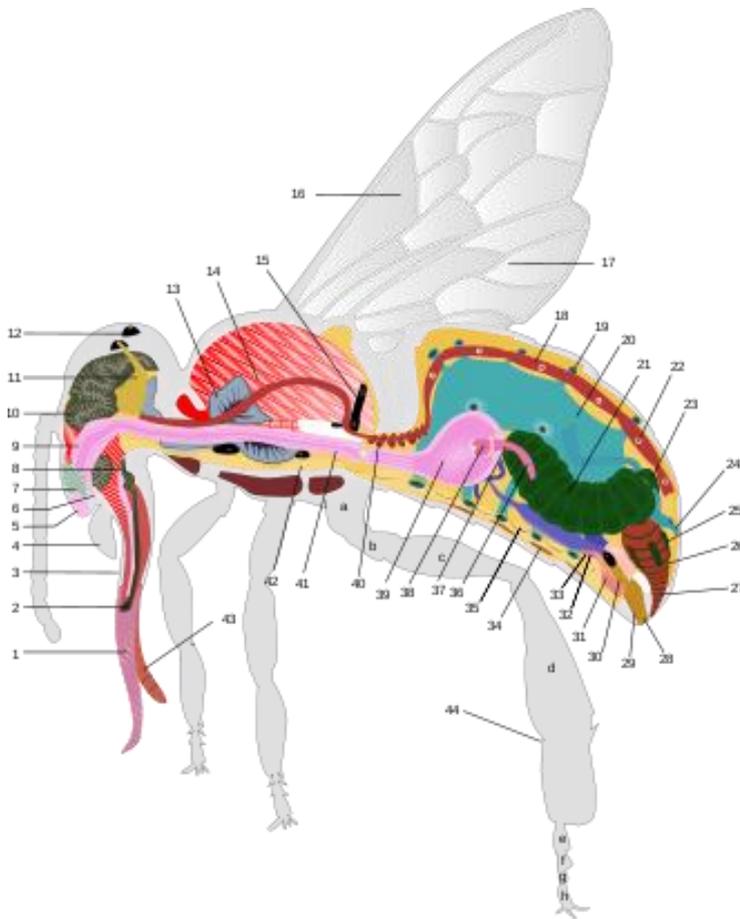
esqueleto rígido e flexível e a colagem do tecido.

A execução da montagem é praticamente construída de forma artesanal. Onde cada uma das peças é montada de forma individual peça por peça. Ou seja, a montagem de cada asa, seja ela, exterior esquerda ou direita e/ou posterior esquerda ou direita, e estas podem ser automatizadas utilizando-se de prensas de pequeno porte e montagem das articulações piezo-elétricas. Onde na prensa se constrói o sistema de esqueleto fixo e após a moldagem do esqueleto fixo, executa-se a montagem das articulações piezo-elétricas. A montagem das articulações também pode ser automatizada utilizando-se de moldes com colagem das articulações nos esqueletos.

Na imagem abaixo pode-se observar a complexidade das estruturas esqueléticas das asas das abelhas; Estruturas estas que imitam as estruturas das folhas das plantas; Pode-se utilizar a mesma complexidade nas estruturas das aeronaves MAV como segue na imagem abaixo:

A fabricação de asas das aeronaves MAV de forma automatizada e seriada garante que todas as asas possuam a mesma geometria e a mesma flexibilidade, o mesmo tamanho e o mesmo peso. Garantindo-se assim que todas as asas possuam o mesmo momento de inércia postando-se assim que o voo através de batimento e torção ocorra da mesma maneira para diferentes aeronaves MAV, sejam nas asas exteriores quanto nas asas posteriores.

É interessante também que o corpo das aeronaves MAV tanto em relação a tórax, quanto em relação à cabeça e às antenas; e também em relação ao ferrão e em relação as patas, estas todas devem serem construídas e montadas utilizando-se de montagem através de moldes para garantir que suas dimensões todas sejam equivalentes e semelhantes umas com as outras. Ou seja, todas as aeronaves MAV são iguais e similares.



10.1.5. Testes experimentais

Os testes experimentais das asas se iniciam com a dinâmica vertical da articulação, em seguida, realizam-se os testes de dinâmica rotacional; após estes, realizam-se os testes de dinâmica sincronizada; testes de voo vertical para cima, para baixo; testes de voo horizontal para frente e para trás; e testes de guinada horário e anti-horário.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Realizam-se então os testes de carga transportada e missão específica; e testes de retorno à base. Todos estes testes realizados em laboratório, em sala limpa. Após estes testes, podem-se realizar os testes na natureza aberta e em ambientes hostis. Após este, os equipamentos podem então serem utilizados em campo e em missão.

Assim as aeronaves MAV realizam todos os testes e simulações de voos desejados, sejam eles voos em ambiente controlado inicialmente, como em voos em ambientes hostis. Somente depois de se realizar os testes em ambientes hostis e com o devido sucesso nestes, é que a aeronave MAV é colocada para atuação em missão verdadeira.

Ou seja, estamos falando de 3 fases: a primeira com ambiente controlado, a segunda com ambiente hostil de risco e a terceira fase como operação verídica e não apenas um teste.

É interessante notar que a mesma missão pode ser planejada pela Base e sua execução pode ser diferida de uma aeronave MAV para outra. Somente quando a aeronave MAV executar as duas primeiras fases em contento (fase de ambiente controlado e fase de ambiente hostil) é que se coloca a aeronave MAV para uma operação de alto risco planejada e verídica.

Os testes experimentais passam pela seguinte curva: decolagem VTOL, voo pairado, voo frontal, voo guinada para direita, voo guinada para esquerda, aproximação de alvo, detecção de alvo, informação para a Base de alvo localizado, informação para outras aeronaves MAV próximas do alvo, afastamento do alvo, aproximação novamente, localização e confirmação de alvo procurado e detectado, voo pairado próximo do alvo, pouso VTOL em segurança, aguardando novas orientações e de estratégia emitidas pela Base.

Estes testes devem ser executados com diferentes qualidades de alvos: sejam eles drogas, armas, objetos tóxicos, objetos químicos perigosos, substâncias químicas perigosas, pessoas procuradas pela polícia e pelos setores militares; estes objetos e pessoas procurados devem ser capazes de serem localizados através de algoritmos de semelhança que são manipulados pelas antenas das aeronaves MAV, contudo estes algoritmos devem ser processados pela Base, pois esta não possui limitação de memória nem de processamento. Já as aeronaves MAV devem ser o mais leve e o mais simples possível resguardando somente a leitura das informações e o envio desta leitura para a Base.

Desta forma os testes experimentais devem ser capazes de garantir que a simulação de um ambiente hostil verdadeiro possa ser verificado e repetido diversas vezes com diferentes aeronaves MAV.

É interessante que os testes sejam realizados com 100% das aeronaves e não somente com uma amostra ou com uma série fabricada. Estes testes não são destrutivos por isso podem e devem ser realizados com todas as aeronaves MAV que vierem a entrar em campo de operação.

A não conformidade de um ou parte de um teste experimental, não invalida a aeronave. Mas cabe para esta aeronave a correção seja correção de voo, seja de decolagem ou de pouso, seja de voo guinado, seja de informação para outras aeronaves MAV, seja de informação para a Base, seja de recepção de nova missão, ou mesmo de localização de um alvo procurado.

A aeronave não conforme é corrigida e recolocada em testes. Assim que os testes que estavam não conformes sejam corrigidos, esta aeronave MAV pode ser colocada em operação real. Assim os testes não são excludentes, mas sim são direcionadores de eventuais divergências e permitem correção e ajustes de operação quando estes forem postos em ação real e verdadeira.

É interessante que testes experimentais sejam executados de forma periódica como um processo de manutenção preventiva. Ou seja, de acordo com um determinado número de horas de operação, deve-se retirar a aeronave MAV de produção e coloca-la e testes e manutenção preventivos.

Desta forma as aeronaves MAV devem realizar tanto manutenção preventiva segundo um determinado número de horas de voo e também devem realizar manutenção corretiva no caso de uma observação de não conformidade em operação.

Uma Investigação Computacional de formação de voo inspirada em vida e efeito solo [11]:

O batimento das asas das abelhas e dos veículos MAV que venham a imitar o voo das abelhas pode ser influenciado pelo surgimento de resposta aerodinâmica de efeito solo. O surgimento do efeito solo pode ser modelado através de uma construção de algoritmos computacionais que venham a imitar o surgimento do mesmo. O efeito solo não é desejado, contudo torna-se inevitável a convivência física com o mesmo. Quando ocorre o batimento este empurra o ar para baixo que reflete no solo e volta para cima empurrando a abelha ou o MAV para cima. Assim, a decolagem e o pouso VTOL das abelhas e dos MAV que imitam abelhas precisam considerar este princípio de reflexão de efeito solo durante sua operação VTOL.

O efeito solo é totalmente indesejado, contudo sua existência é inevitável. A aeronave ao realizar o batimento do ar para baixo como consequência do empurrão do ar pelo batimento para baixo cria uma onda que toca o chão ou o plano onde a aeronave intenciona pousar e este fluxo de ar toca o chão e volta para cima e empurra a asa e o corpo para cima. Este empurrão do ar não somente gera este empuxo vertical, mas também gera uma instabilidade no voo pairado ou mesmo no voo VTOL.

O efeito solo gerando uma instabilidade no voo VTOL e no voo pairado próximo ao solo, é um processo inevitável, apesar de ser totalmente indesejado. Este empuxo provocado pelo efeito solo empurra as asas para cima e empurra também o corpo da abelha ou da aeronave MAV para cima. Este empuxo é dado pela equação abaixo:

$$F_{arref} = 1/2 * \rho * V^2 * S * c_d$$

onde:

F_{arref} = força de arrasto provocada pelo efeito solo

ρ = densidade do ar

V = velocidade do ar pelo efeito solo

S = área da asa

c_d = coeficiente de arrasto pelo efeito solo

Desta forma, a força de arrasto provocada pelo efeito solo depende da velocidade de empuxo na resposta do ar pelo efeito solo, e depende também da área de empuxo que une as áreas das asas e também a área do corpo da abelha ou do corpo da aeronave MAV.

Quanto maior for a velocidade de empuxo pelo efeito solo, e também quanto maior for a área de arrasto, maior será a força de arrasto provocada pelo efeito solo.

É interessante notar que o efeito solo ocorre não somente no pouso, mas também ocorre no voo pairado próximo à superfície e também na decolagem. Ou seja: tanto no voo VTOL, quanto no voo pairado.

Modelos computacionais podem e devem ser construídos para se realizar simulações e controle nos modelos de pouso e decolagem e também no modelo do voo pairado. Estes modelos computacionais construídos podem ser utilizados a partir do comando da Base para que esta possa compensar os princípios do efeito solo.

Desta forma, com estes modelos computacionais construídos para compensar os problemas gerados pelo efeito solo, tanto o voo VTOL quanto o voo pairado próximo à superfície, pode ser compensado e podem corrigir eventuais instabilidades nestas condições de voo.

É interessante notar que as equações de controle devem passar a ter uma força de compensação de arrasto provocado pelo efeito solo. Ou seja, a equação passa a ser construída da seguinte forma:

$$F_z = F_{empc} + F_{arraefs} - m \cdot g, \text{ ou}$$

$$m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) \cdot R \cdot b \cdot (cdvc - cdvb) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{es}^2 \cdot S \cdot cdes - m \cdot g$$

F_z = força vertical resultante para cima

F_{empc} = Força de Empuxo para cima

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Farrefs = força de arrasto provocada pelo efeito solo

m = massa do sistema

g = aceleração da gravidade

d^2z/dt^2 = aceleração na vertical

rho = densidade do ar

w = velocidade angular de batimento da asa

R = raio da asa

b = corda média da asa

cdvc = coeficiente de arrasto vertical para cima

cdvb = coeficiente de arrasto vertical para baixo

Ves = velocidade do ar provocado pelo efeito solo

S = área do corpo mais a área das asas

cdes = coeficiente de arrasto provocado pelo efeito solo

11.1.1. Efeito Solo

O efeito solo é bastante estudado na decolagem e no pouso VTOL dos helicópteros, pois sua aerodinâmica torna o efeito solo um princípio inevitável. Já para sistemas MAV que venham a imitar as abelhas, também surge o mesmo, contudo com princípios de fluxo de ar diferentes. Quanto maior o efeito solo, menor será a energia necessária para executar a decolagem e o pouso, uma vez que parte desta energia será compensada pelo fluxo de ar que toca o solo e volta para a aeronave; no entanto, menor a energia, mas maior a instabilidade de voo.

Ou seja, a energia necessária para pouso e para decolagem e também para voo pairado pode ser minimizada, quando compensada pelo efeito solo, no entanto sua instabilidade tanto no pouso quanto na decolagem e no voo pairado se torna extremamente crítica.

Esta instabilidade que ocorre nas aeronaves do voo com asas rotativas também são repetidas e geram uma grande instabilidade no voo das abelhas e também na decolagem, pouso e voo pairado nas aeronaves MAV.

A equação de voo vertical representa a seguir faz com que uma hipotética técnica de controle com uma compensação da força da gravidade e também uma compensação da força provocada pelo efeito solo.

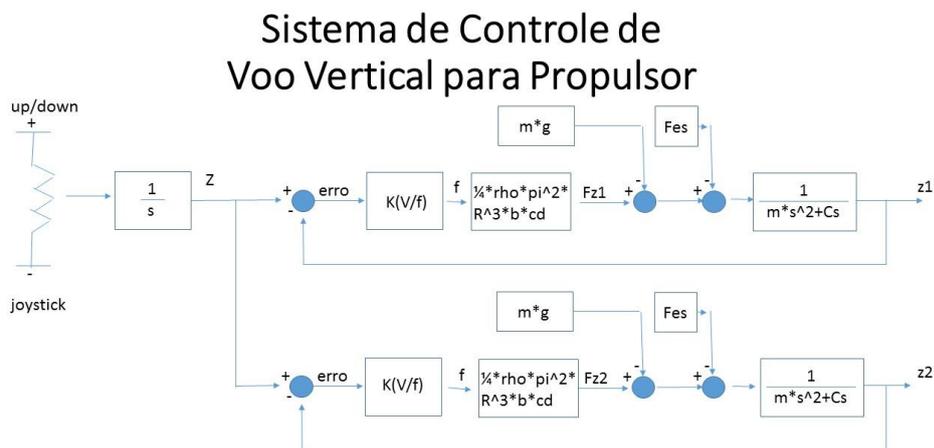
onde a equação segue abaixo:

$$m \cdot d^2z/dt^2 = 1/2 \cdot \rho \cdot (w^2 \cdot R^2) \cdot R \cdot b \cdot (cdvc - cdvb) + 1/2 \cdot \rho \cdot V_{es}^2 \cdot S \cdot cdes - m \cdot g$$

Fes = força de efeito solo

Desta forma a segunda parte da equação de voo vertical (efeito solo) permite a compensação da primeira parte da equação (voo VTOL ou pairado) e ambas agem contrária a terceira parte da equação (aceleração da gravidade).

Uma equação de controle para voo vertical deve levar em consideração as 3 partes da equação de voo vertical. Uma possível equação pode ser apresentada a seguir:



Sistema análogo para todos os sensores de altitude: z3, z4, z5, z6, z7, z8, z9, z10, z11, z12

Copyrights and Intellectual Proprieties belong to VBJ Engenharia

11.1.2. Voo em formação

As abelhas em muitos casos voam em grupo, realizando um voo em formação. Veículos MAV podem ter missões coletivas para atuações específicas, por exemplo para localização de, por exemplo, armas químicas e/ou armas radioativas. Assim, os MAV tem que ser capazes de realizar voo em formação e em grupo. De forma, que através de sistemas micro-eletrônicos e nanotecnológicos possam localizar um ao outro sem que ocorram colisão entre eles. Isto pode ser realizado com sistemas GPS e navegadores eletrônicos instalados em cada um dos equipamentos de forma a monitorar o voo um aos outros.

O princípio biológico de voo em conjunto é denominado mormuration. Este princípio denominado mormuration é observado em voos de diversos pássaros, onde quando um faz uma curva para a esquerda, todos os outros, voando em conjunto também executam a curva para a esquerda.

Da mesma forma, quando um pássaro faz uma curva para a direita, todos os outros, voando em conjunto também executam a curva para a direita.

Este voo coletivo também é observado nas abelhas. Onde todas em conjunto voam em busca do desejado pólen de flores procuradas.

Este voo em murmuration não é trivial para ser programado, uma vez que este depende de um conjunto enorme de variáveis medidas por sensores diversos. Sensores que precisam medir o voo continuado de diversos MAV em sincronia. Ou seja, sensores que medem à frente, à cima, à baixo, atrás, não somente para uma aeronave, mas sim para todo o conjunto de aeronaves MAV de forma síncrona e simultânea.

Quando a Base informa para as aeronaves MAV que devem executar o voo em murmuration ou seja em formação, imediatamente as aeronaves acionam os sensores periféricos que passam a monitorar os voos de aproximação e afastamento de cada uma das aeronaves MAV e a partir de então os sensores controlam as distâncias e as velocidades relativas de voo de todo o conjunto de enxame de MAV.

O voo em formação é muito complexo de ser gerido, pois depende de controle multi-variável que depende de velocidade relativa, posição relativa, monitoria à cima, monitoria à frente, monitoria aos lados, monitoria abaixo, ou seja, as aeronaves MAV que passam a voar em formação precisam gerir uma série de variáveis de controle que não pode ser limitada para o voo desejado de uma aeronave por si só.

Se pensarmos que o voo em formação pode ser administrado por um número enorme de aeronaves, isto se torna ainda mais complexo. Imagine por exemplo 100 aeronaves MAV voando simultaneamente em voo de formação. O modelo matemático se torna extremamente complexo.

Esta dinâmica de deslocamento em formação é observada em diversos animais, entre eles: as gaivotas, os papagaios, as araras, as borboletas quando saem conjuntamente do casulo, entre outras diversas espécies. Este voo que é observado nestes animais também é observado no meio aquático nas baleias, nos golfinhos e nos tubarões e também no meio terrestre como observado nos leões, nos búfalos, nos elefantes, somente para citar alguns.

O voo em formação ou o deslocamento em formação terrestre ou aquática permite que o enxame se proteja uns aos outros garantindo a sobrevivência da espécie. No caso das aeronaves MAV o voo em conjunto permite aumentar a capacidade potencial de localização de alvos desejados e procurados.

Ou seja, quanto maior for o número de aeronaves MAV em operação em um enxame, maior será a chance e a oportunidade de que estas aeronaves MAV consigam localizar os objetos e alvos procurados.

Desta forma, o voo em formação é complexo para ser controlado, mas por outro lado é extremamente propício e interessante para se alcançar os objetivos de voo do sistema coletivo.

11.1.3. Métodos Numéricos

O modelo de voo das abelhas pode e deve ser construído utilizando-se métodos de simulação numéricos de aerodinâmica. Estes modelos numéricos permitem realizar uma grande economia para quando for realizado a construção, manufatura e testes do sistema MAV completo. Métodos numéricos auxiliam a compreensão tecnológica e também diminuem custos de fabricação de maneira a dirigir a fabricação dos sistemas completos para a construção de modelos e de aeronaves com sucesso.

Como o modelo de voo das abelhas é baseado no princípio continuado de batimento vertical, torção horária e anti-horária e batimento horizontal com a respectiva torção horária e anti-horária, pode-se manter estes movimentos usando uma sequência numérica de alteração dos batimentos e das torções comandando em si os sistemas piezo-elétricos que executam os batimentos e as torções.

Ou seja, a Base envia um comando para a MAV desejada e esta automaticamente sabe que este comando significa determinada sequência de batimento e de torção aplicada nas articulações piezo-elétricas.

Este princípio de comando e controle manipulado de forma numérica, faz com que a modelagem de controle de voo, seja bastante simplificado. Para isso, basta que a aeronave MAV receba a sequência numérica da Base e passe a executá-la.

Isto ocorre como que se as articulações piezo-elétricas operem de forma passiva, seguindo à risca o comando enviado pela Base para a aeronave.

Ou seja, a aeronave MAV opera de acordo com o comando numérico emitido pela Base. Sendo que este comando somente é substituído por um novo comando ou por uma mudança dinâmica de murmuration do enxame, que obriga a aeronave a modificar seu voo, individual por uma modificação de voo coletivo.

Métodos numéricos são extremamente eficientes, uma vez que a dinâmica de voo frontal, vertical, de guinada e lateral pode ser executada facilmente usando-se de uma sequência matemática e numérica que manipula as articulações piezo-elétricas das aeronaves.

Sabendo que as asas das aeronaves MAV possuem 3 articulações para cada asa exterior e mais 3 articulações para as asas posteriores, através de uma sequência numérica que altera estas articulações, este faz com que o voo das aeronaves seja bastante eficiente de se executar e simples de se controlar.

Estamos falando de um modelo linear, mas que também pode ser modelado, construído e testado para ser um modelo de retroalimentação em malha fechada. Onde a Base define a variável de controle desejada e o modelo em malha fechada corrige a amplificação do erro de voo e ajusta a planta da aeronave para se exercer o movimento planejado.

Ou seja, estamos propondo 2 sistemas diferentes de controle de voo. O primeiro baseado em Métodos e Sequências Numéricas e o segundo baseado em Controle Retroalimentado de Malha Fechada.

Ambos os modelos são bastante eficientes e podem ser aplicados a contento. Com a diferença que o modelo de método numérico não executa a leitura dos sensores de retroalimentação e o modelo em malha fechada o faz.

Com esta exposição pode-se considerar que o modelo em malha fechada é mais preciso do que o modelo de método numérico.

11.1.4. Métodos para Batimento de Asas

Os modelos numéricos devem ser capazes de simular tanto o método de batimento das asas, quanto o método de rotação das mesmas. Estes modelos devem ser capazes de dimensionar o impulso médio vertical para cima, durante a decolagem VTOL, o voo e o pouso VTOL. Deve também ser capaz de dimensionar o efeito solo; e a capacidade de voo horizontal para frente e para trás; e também o voo de guinada horário e anti-horário. Com os modelos numéricos representando o batimento das asas, estes devem ser capazes de modelar toda a dinâmica de voo dos MAV que venham a imitar as abelhas.

Através de vídeos em movimento lento do voo das abelhas, observa-se que esta executa o voo de maneira que as asas exteriores realizam um batimento para baixo e para cima, alternado com uma torção horária e anti-horária. Da mesma forma, as asas posteriores realizam um batimento para trás e para frente, alternando com uma torção horária e anti-horária.

Este princípio também pode e deve ser implementado nas aeronaves MAV. Como dito no capítulo anterior este modelo de batimento e torção permite um movimento de voo desejado seja ele de zunho simplesmente de sequência numérica, seja ele em malha fechada calculada pela Base.

Ou seja, o batimento das asas é impulsionado pela dinâmica das articulações piezo-elétricas. E esta dinâmica ocorre tanto para as asas exteriores quanto para as asas posteriores.

Se não houvesse a torção horária e anti-horária após a execução do batimento, a força de empuxo para cima seria equivalente à força de empuxo para baixo e a aeronave MAV seria movimentada para o solo pela força peso e não seria sustentada pelas asas.

Assim, o método de batimento pelas asas é essencial para a execução do voo a contento. Sem o qual as aeronaves MAV e também as abelhas não conseguiriam se sustentar em voo na atmosfera e nem próximo ao solo.

O modelo de batimento das asas das abelhas é completamente diferente do modelo de voo das asas das aves de grande porte, como por exemplo as águias, os falcões, os condores, as gaivotas.

Nestas aves não ocorre a torção para se executar o voo pairado, mas sim estas aves aumentam a extensão de suas asas quando as movimentam para baixo e diminuem sua extensão das asas quando as movimentam para cima.

A torção também ocorre nas aves, quando desejado o empuxo para frente, mas não como no modelo de torção para sustentação do voo das abelhas.

Assim o método de batimento das asas das abelhas é exclusivo para o voo de insetos e somente pode ser aplicado em aeronaves MAV (Micro Air Vehicles) não em aeronaves SAV (Small Air Vehicles). Pois em veículos de porte médios e grandes, estes possuiriam um momento de inércia muito grande em suas asas e em seu batimento.

O Método de batimento das asas em malha fechada é calculado e programado na Base e esta, através da medição de velocidade e posição nas aeronaves MAV, calcula o erro de voo e posição programados e envia o valor calculado e corrigido para a nova condição de voo planejado, ou seja, a MAV faz a leitura da velocidade e posição em tempo real, envia estas informações para a Base e esta calcula o erro em relação ao voo desejado e amplifica o erro, sua derivada e sua primitiva, e corrige o valor modificado para a nova condição de voo da planta, no caso de voo da aeronave MAV.

Desta maneira a Base fica o tempo todo lendo as condições de velocidade e posição de voo e se mantém enviando novas condições de voo durante toda a execução e jornada as aeronaves MAV controladas.

Ou seja, a MAV realiza a leitura das condições de voo, envia estas condições para a Base; e a Base calcula o erro, corrige a nova condição de voo e envia esta nova condição de voo para a aeronave. É evidente que isto ocorre em paralelo com todas as aeronaves MAV que voem simultaneamente durante o intervalo de tempo desejado.

11.1.5. Força e Potência

Quanto maior a frequência de vibração das asas das abelhas ou dos MAV que venham a imitar as abelhas, maior será sua força de voo vertical e maior será sua potência de atuação, pois maior será a força e maior será a velocidade. Além da frequência também ocorre a amplitude de rotação, que quanto maior esta for, maior será o empuxo horizontal e maior será o comportamento dinâmico de guinada. Contudo, frequências elevadas (entre 20 Hz e 20 KHz) geram ruídos elevados. É interessante observar que a frequência de oscilação das asas dos MAV ocorre na frequência em torno de 190 Hz ou seja ocorrem ruídos que são ouvidos e permitidos observar. Para MAV mais pesados torna-se inevitável o aumento da frequência de vibração.

Como a força de empuxo vertical ou horizontal depende da frequência de trabalho ao quadrado, quanto maior for a frequência maior será sua força de arrasto, seja arrasto vertical ou horizontal.

A força de arrasto e a velocidade de batimento são dados pela seguinte formulação:

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b c_d$$

$$w = 2 \pi f$$

Ou seja, quanto maior for a frequência de trabalho, maior será sua velocidade de batimento e maior será a sua força de arrasto. Esta formulação da força de arrasto vale tanto para a força de arrasto vertical quanto para a força de arrasto horizontal.

Como a formulação de Potência é dada multiplicação da força vezes a velocidade, e a velocidade é dada pela primitiva da aceleração pode-se então ter as seguintes formulações:

$$m \cdot dv_v = (F_{arr_v} - m \cdot g) \cdot dt$$

$$m \cdot dv_h = F_{arr_h} \cdot dt$$

$$Pot_v = F_{arr_v} \cdot v_v$$

$$P_{oth} = F_{arrh} \cdot v_h$$

onde

m = massa

dv_v = diferencial de velocidade vertical

dv_h = diferencial de velocidade horizontal

F_{arrv} = Força de Arrasto Vertical

F_{arrh} = Força de Arrasto Horizontal

dt = diferencial de tempo

v_v = velocidade vertical

v_h = velocidade horizontal

P_{otv} = Potência de voo Vertical

P_{oth} = Potência de voo horizontal

Assim, tem-se as relações de Força e Potência tanto do voo das abelhas quanto do voo das aeronaves MAV. E como a força depende da frequência de trabalho e a velocidade depende da primitiva da aceleração, sabendo-se a frequência de trabalho, sabe-se sua força e sabe-se também sua velocidade de trabalho de operação que pode ser calculado para a Potência de operação e de trabalho, uma vez que se sabe a velocidade máxima de trabalho que opera em torno da frequência máxima de batimento deduzido o arrasto de dinâmica do sistema, seja a abelha ou seja o MAV.

Ou seja, sabendo-se a frequência, sabe-se a força de arrasto. E sabendo-se a força de arrasto e a massa do sistema, sabe-se a aceleração de trabalho do sistema, cuja primitiva permite saber o valor da velocidade de trabalho máxima, dada pela subtração do arrasto do sistema que gera uma aceleração igual a zero e desta forma consegue-se dimensionar a Potência de trabalho do sistema, seja o sistema as abelhas como também as aeronaves MAV.

11.1.6. Descrição de Geometria de Flap

A geometria das asas nas abelhas é formada e representada por um tipo de faca arredondada que possui em sua raiz uma diminuição de largura, onde ocorre a articulação vertical e rotacional. Assim, na ponta da asa há um arredondamento horizontal que a medida que se aproxima da raiz, forma-se a geometria de faca arredondada e quando se torna bastante próxima a raiz, esta diminui de tamanho para posicionar a articulação vertical e de rotação. Na borda de ataque da asa esta apresenta de forma bastante estável, enquanto que ao longo da borda de fuga e do centro da asa, ocorrem a flexão e a torção.

Esta geometria arredonda na extremidade da asa e encolhida na base da mesma é bastante interessante pois permite um movimento de torção e de batimento de forma altamente eficiente. É interessante que as asas das aeronaves MAV também possuam esta geometria (arredondada na ponta e encolhida na base da asa). É importante lembrar que a ponta arredondada diminui o vórtice de ponta de asa e também é interessante observar que a base encolhida permite um princípio rotacional mais eficaz, do que se a base fosse larga.

Assim uma base de asa menor capacita e permite uma rotação da asa mais eficaz e uma ponta de asa arredondada permite uma formação de vórtice instável de menor intensidade. Desta forma a asa da abelha deve ser imitada na asa das aeronaves MAV.

Estamos, portanto mencionando e defendendo a tese de que a aeronave MAV deve imitar em 100% a dinâmica e a geometria da asa das abelhas. A única diferença que deve existir é que o sistema piezo-elétrico da asa das aeronaves MAV deve imitar a articulação muscular neurológica e nervosa das asas das abelhas.

Sendo que a geometria da asa das MAV deve ser o mais parecido possível com as asas das abelhas. Ou seja, geometria de faca na borda de ataque, geometria arredondada na ponta de asa e geometria encolhida na base da asa.

Com estas 3 características acredita-se que o comportamento dinâmico das asas das aeronaves MAV seja semelhante ao comportamento dinâmico das asas das abelhas.

Este princípio que é observado nas asas exteriores das abelhas, também ocorre e são observados nas asas posteriores das abelhas; e desta forma deve também ocorrer nas asas posteriores das aeronaves MAV.

Ou seja, o princípio geométrico observado nas asas exteriores também deve ser observado nas asas posteriores, e desta forma também exerce a borda de fuga, a geometria arredondada na ponta de asa e diminuição da geometria na base da asa que permite a execução da rotação das asas posteriores.

Essa geometria de flap das asas das abelhas torna o movimento de batimento, de torção e de arrasto muito eficaz e permite que esta geometria possa ser imitada de forma a capacitar o movimento da geometria da asa e torne a dinâmica de movimento da asa das aeronaves MAV que as imitem muito satisfatória, muito diferente de uma aeronave de asa fixa ou de uma aeronave de asa rotativa quanto um movimento de asa de uma ave de grande porte.

A geometria de flap das asas das abelhas é totalmente diferente da geometria das asas de uma aeronave de asa fixa, e também de uma aeronave de asa rotativa ou mesmo de uma asa de aves de médio e grande porte.

A grande diferença que ocorre nas asas das abelhas em relação aos outros tipos de asas que são conhecidos é a torção horária quando a asa está na sua posição mais baixa de batimento e a torção anti-horária que ocorre quando a asa está na posição mais alta de batimento.

Esta torção torna a dinâmica de asa única em relação a outros animais. Esta torção também é observada em outros insetos, mas não é vista nem em aeronaves feitas pelo homem (asa fixa e asa rotativa) e também não é vista em aves de médio e grande porte.

O motivo de não se observar este modelo de asa de batimento e torção em aves de médio e grande porte é o fato de que o momento de inércia das asas das aves de grande e médio porte é muito elevado quando comparado às asas dos insetos.

Uma estrutura computacional para interação de fluídos inspirados biologicamente e asas de batimento flapeadas [12]:

Um modelo numérico computacional para, representar o fluxo dos fluídos aerodinâmicos provocados pelo batimento das asas, pode e deve ser construído de maneira a compreender as características técnicas de inércia e viscosidade do Número de Reynolds, que no caso das abelhas é baixo. A compreensão do fluxo dos fluídos da atmosfera em torno das asas das abelhas permite vir a otimizar o comportamento dinâmico dos fluídos nas asas das aeronaves MAV que vierem a imitá-las.

Assim, estabelece-se uma relação do Número de Reynolds, que define uma relação entre variáveis de inércia e condições de viscosidade bastante baixo. Ou seja, o número de Reynolds do batimento e voo das abelhas é baixo. E da mesma forma e de modo análogo o número de Reynolds do sistema de voo das aeronaves MAV também é bastante baixo.

O significado físico do número de Reynolds (Re) é o quociente de forças entre as forças de inércia ($v \cdot \rho$) e as forças de viscosidade (μ/D), sendo:

$$Re = \rho \cdot v \cdot D / \mu$$

- v = velocidade média do fluido

- D = longitude característica do fluxo, o [diâmetro](#) para o fluxo no tubo

- μ = [viscosidade](#) dinâmica do fluido

- ρ = [massa específica](#) do fluido

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

O modelo matemático que representa o número de Reynolds, tanto das asas das abelhas quanto das asas das aeronaves MAV é tal que permite uma relação de número de Reynolds baixo, ou seja a turbulência do fluxo de ar é baixo o que capacita as aeronaves MAV e às abelhas para um voo sem turbulência e portanto eficaz e tranquilo.

Ou seja, como o número de Reynolds do voo das abelhas e do voo das aeronaves MAV é baixo, isto permite que a turbulência de voo das mesmas é também bastante baixo. Portanto, a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas é pequeno.

O modelo matemático que permite gerar uma estrutura computacional que gera uma interação de fluídos inspirados pela biologia pelas asas de batimento flapeadas e de torção das aeronaves MAV opera de maneira bastante suave quando comparadas com sistemas de voo que usam grandes turbulências, como por exemplo nas asas rotativas de helicópteros e asas de voo de outros sistemas de voo VTOL e nas aletas das turbinas dos motores de aviões a jato.

Modelos matemáticos de número de Reynolds elevados ocorrem tanto em pás de aeronaves com asas rotativas e também nas aletas das pás das turbinas dos motores de aviões a jato. Nestas condições o número de Reynolds é bastante elevado.

Ou seja, nestas condições de voo, as forças de inércias são maiores que as forças viscosas do fluxo em operação que definem um número de Reynolds elevado. Podemos então pensar e admitir que o número de Reynolds das aeronaves MAV e das abelhas é um número baixo com a relação pequenas entre as forças de inércias e as forças viscosas.

A comprovação de número de Reynolds baixo significa que tanto o voo das abelhas ou quanto o voo das aeronaves MAV são estabelecidas de maneira bem suave quando comparadas com outras aeronaves e/ou modelos de voo de outros sistemas de voo VTOL.

Ou seja, uma estrutura matemática computacional para interação de fluídos, sejam eles inspirados biologicamente, e através da relação das asas de batimento flapeadas, observadas nas aeronaves MAV e nas abelhas, capacita uma relação de baixo nível de turbulência quando comparada com outros sistemas de asas VTOL.

O modelo matemático de voo VTOL que tem de representar e ser representado pelas aeronaves MAV identificada pelo voo das abelhas de maneira a tornar o voo o mais suave possível de maneira a tornar a turbulência leve em sem grandes empuxos de força e de picos de empuxos.

Ou seja, o pico de empuxo deve ser substituído por batimentos e voos suaves de baixo número de Reynolds e, portanto baixa turbulência.

12.1.1. Projeto Eficiente de Asas Flapeadas em 3 Dimensões

O projeto matemático das asas de batimento e de rotação precisam ser capazes de modelar e dimensionar um MAV específico para cada categoria de asa específica. Consideramos que em insetos do tamanho e peso próximos das abelhas, suas asas são eficientes, no entanto, se pensarmos em supostas abelhas maiores e mais pesadas, é possível e bastante provável que o modelo de asa de batimento e rotação não seja igualmente eficiente.

Assim em aves de grande porte o uso de asas flapeadas não se torna interessante. Ao invés de usar as asas flapeadas e com torção as aves de grande porte alteram o raio de extensão das asas, diminuindo o raio quando a asa sobe, diminuindo assim seu empuxo para baixo e aumentando o raio quando a asa desce, aumentando assim o empuxo para cima. Com o empuxo resultante médio as aves de grande porte exercem sua dinâmica de subida.

No caso das abelhas e na aplicação de aeronaves MAV o modelo de empuxo vertical ou frontal opera com asas em 3 dimensões pois não ocorre somente o empuxo vertical, mas também ocorre o empuxo frontal e de torção horário e anti-horário.

Este modelo em 3 dimensões, de batimento e torção permite uma grande eficiência em insetos de pequeno porte, principalmente nas abelhas e também é bastante eficiente nas aeronaves MAV que imitam o voo das abelhas.

Este modelo de batimento e torção em insetos de pequeno porte, observado nas abelhas, ocorre nos insetos, mas não ocorre em aves de médio e grande porte. Assim este modelo somente é eficiente em asas flapeadas de 3 dimensões no caso de insetos, tais como formigas aladas, borboletas, zangões, abelhas, abelhas rainha, etc.

Em aves de médio e grande porte, como falcões, águias, gaivotas, condores este modelo de 3 dimensões não é viável. Desta forma observamos como um modelo de Engenharia de Natureza é eficiente e fundamental para o estudo e avanço de diversas cadeiras de engenharia. Pois pode-se estudar modelos de voos de diferentes tipos em diferentes observações de aves e de insetos, isto somente para tratar condições de voo delas.

Uma hipotética cadeira de Engenharia da Natureza, permite um enorme cabedal de conhecimentos e de observações extremamente ricos de variedade e não somente em relação a voo, mas em relação a todos os modelos de dinâmica das aves, dos mamíferos, dos répteis, dos anfíbios, dos insetos etc.

Estudar os modelos de voo de diferentes espécies na suposta Engenharia da Natureza, permite um enorme crescimento e aprendizado de diversos modelos distintos incluindo condições de voo pairado, voo contra o vento, voo a favor do vento, decolagem e pouso VTOL, voo guinado horário, voo guinado anti-horário, subida, descida, em fim todo um cabedal de conhecimento que pode vir a ser observado, estudado e aprendido.

Cabe, portanto a seguinte pergunta: Como fazer um projeto eficiente de asas flapeadas em 3 dimensões? A resposta é bastante simples, mas o conjunto de derivações da mesma é bastante complexo, variado e extenso.

A resposta simples é imitar o voo das asas de batimento e torção. Contudo suas derivações são complexas e extensas. Por exemplo no caso do voo das aeronaves MAV, pode-se variar a frequência de batimento, pode-se variar o raio de extensão da asa, pode-se variar a corda média da asa, pode-se variar o coeficiente de arrasto, para cima e para baixo, ou para frente e para trás.

Enfim, há um enorme cabedal de funções que podem ser trabalhadas não somente isoladas, mas também em conjunto sistêmico. Ou seja, pode-se variar o empuxo das asas, alterando-se a frequência de batimento das mesmas, pode-se variar o raio de extensão da asa, pode-se variar a corda média da asa, pode-se variar o coeficiente de arrasto.

Já no caso das aeronaves MAV, o modelo de voo pode ser simplificado, utilizando-se somente o batimento e a torção em uma frequência previamente estabelecida. No caso das abelhas operam em torno de 190 Hz.

12.1.2. Estruturas Passivas para empuxo em 2-D

O modelo matemático para voo horizontal para frente ou para trás passa por um princípio de empuxo horizontal sem considerar a necessidade de voo e de guinada. Assim o modelo de empuxo em 2-D é mais simples e fácil de construir do que um modelo completo de voo em 3-D que considera também a necessidade de voo em guinada. No modelo em 2-D considera-se decolagem VTOL, voo horizontal e pouso VTOL. a frequência de batimento, pode-se variar o raio de extensão da asa, pode-se variar a corda média da asa, pode-se variar o coeficiente de arrasto.

Ou seja, no caso de voo em 2 dimensões, não se considera o voo em guinada, somente o voo VTOL, o voo horizontal e o voo pairado. No voo em guinada para a esquerda (anti-horário) a asa da direita realiza empuxo, enquanto que a asa da esquerda não realiza empuxo. Já no caso do voo guinado para a direita (horário) a asa da esquerda realiza empuxo, enquanto a asa da direita não realiza empuxo.

Essa combinação permite o voo em 3 dimensões. Já no caso do voo em 2 dimensões todas as asas realizam o flap de maneira conjunta, sincronizada em sintonia. No voo VTOL para decolagem e também para pouso as abelhas e também as aeronaves MAV estas executam o voo sem guinada. Ou seja, as abelhas realizam aproximação para o voo VTOL e também executam a subida e decolagem VTOL sem que ocorra a mudança de guinada, e portanto, opera em 2 dimensões.

Evidentemente o voo 2-D somente é construído para testes, pois qualquer que seja a aeronaves MAV esta precisa ser capaz de executar o voo em 3-D. Qualquer aeronave MAV precisa ter condição para voar em qualquer direção pois precisa localizar armas químicas, tóxicos, armas, munição, drogas, somente para citar alguns. Assim uma capacidade de voo 3-D é fundamental para o correto exercício de voo em todas as direções para que se possa localizar os objetos procurados

que podem estar escondidos em qualquer localização.

Assim o voo em 2-D é utilizado somente para execução de testes de voo, ou seja, utiliza-se a verificação as condições de voo, e de decolagem e pouso VTOL, e também de voo pairado e voo frontal.

Estas estruturas de teste em voo 2-D podem ser bem eficiente para a execução de confiabilidade e capacidade de voo. Assim, o voo em 2-D pode ser testado em condições mais simples, já o voo em guinada, precisa ser testado em condições de voo 3-D.

Os testes de voo 2-D e 3-D são distintos e devem ser realizados caso a caso, para validar todo o tipo e qualidade de voo. Ou seja, deve-se testar o voo VTOL, o voo pairado, o voo frontal, o voo guinado anti-horário, o voo guinado horário, a aproximação de um alvo, o afastamento de um alvo, o retorno para a Base, etc. No caso das aeronaves MAV todos utilizando malha fechada de controle.

O empuxo 2-D possui estruturas passivas, como por exemplo a cabeça, as antenas, o tórax, o ferrão, as patas, etc. Todas estas estruturas não interferem na qualidade de voo e operam de maneira passiva. No caso das aeronaves MAV estamos falando de baterias de íon-lítio no tórax e no ferrão; e antenas para comunicação com a Base e com outras MAV e patas para apoio e superfícies.

Estas estruturas passivas para execução de empuxo operam gerando um pequeno arrasto diminuindo assim a velocidade máxima de voo frontal. Ou seja, na condição de velocidade máxima de voo frontal, tem -se:

$$F_{emph} - F_{arrh} = m \cdot d^2x/dt^2$$

F_{emph} = força de empuxo horizontal

F_{arrh} = força de arrasto horizontal

m = massa

$d^2x/dt^2 =$ aceleração horizontal

Para condição de velocidade máxima

$d^2x/dt^2 = 0$

$F_{emph} = F_{arrh}$

12.1.3. Projeto Inverso para superfícies flapeadas em 3-D

Já em Modelos 3-D, há a necessidade de se projetar não somente a decolagem, o pouso e o voo horizontal, mas também sua capacidade de fazer curvas em sentido horário e anti-horário. Em modelos 3-D o voo de asas flapeadas (de batimento e rotação) exige dimensionamento de inversão de arrasto da asa da direita em relação ao arrasto da asa da esquerda.

No Modelo 3-D o batimento das asas exteriores opera juntamente com as asas posteriores criando uma dinâmica de voo totalmente sincronizada. Ou seja, o voo das aeronaves MAV realiza avança e curvatura simultaneamente. Para se realizar o voo frontal utiliza-se as asas posteriores e para fazer o voo vertical utiliza-se das asas exteriores e para se realizar o voo guinado, utiliza-se ora sim ora não o voo guinado.

Ou seja, no modelo 3-D ocorre em forma sincrônica e simultânea tanto o voo frontal, quanto o voo vertical como o voo em guinada.

Os testes de voo frontal, vertical e em guinada devem ser realizados de maneira a garantir que a aeronave MAV consiga se movimentar nestas condições. Este modelo de teste de voo em 3-D estabelece uma garantia de voo que permite que a aeronave voe em qualquer ambiente, com geometria de voo complexa, pois a aeronave MAV deve ser capaz de contornar qualquer obstáculo físico que estiver ao alcance da mesma.

Obstáculos podem ser de todo o tipo, desde árvores, pedras, rochas, montanhas, salas

fechadas, rios, lagos, etc. É necessário que a aeronave MAV reconheça estes obstáculos, informe os para a Base e esta desenvolve uma estratégia de conversão e envia esta estratégia em malha fechada para a aeronave de forma a corrigir a rota de voo e desviá-las dos obstáculos observados.

Nos testes em 3-D há a necessidade de se realizar pouso para buscar drogas e tóxicos. Assim os testes de voo pairado e voo VTOL são fundamentais para busca de objetos que necessite de uma busca físico-química específica, que exija contato físico.

Em muitas situações a aeronave MAV precisa pousar em um ambiente de busca. Este ambiente de busca ora necessite de pouso para se realizar um contato físico e uma análise química específica que torna a atuação das aeronaves MAV muito eficiente e também bastante eficaz.

Ou seja, os testes de voo 3-D, incluindo os testes de pouso em superfícies suspeitas, para captação de informações físico-químicas, e também através do contorno de objetos físicos distribuídos no ambiente de observação são fundamentais para vir a serem utilizados em uma missão verdadeira e oficial.

Uma vez executados os testes das aeronaves MAV aprovadas, estas entram em missão oficial. Contudo é interessante que as aeronaves MAV realizem manutenção preventiva a cada conjunto de horas de voo. A manutenção deve ser analisada para cada uma das asas posteriores e exteriores, deve-se realizar também a manutenção das baterias, das patas, das antenas e dos sensores incluindo sensores de filmagem e fotografia e sensores radioativos, anti-drogas e contra tóxicos e contra armas químicas.

A aeronave MAV deve ser capaz de localizar estes delitos e deve poder informar em tempo real o cenário observado pelos sensores para a Base, incluindo todo tipo de delito observável por sensores e que é capaz de salvar vidas.

Desta forma, com sensores adequados e voo em 3-D as aeronaves MAV tem 100% de

chance e de probabilidade para atingir suas metas de trabalho e cumprir a missão a qual foi planejada e designada.

Simulação Numérica de Asa Flapeada com baixo Número de Reynolds [13]:

Como a relação entre forças de inércia e forças viscosas nas abelhas é pequeno, isto gera um Número de Reynolds igualmente pequeno e conseqüentemente um nível de turbulência bastante suave. Desta forma o fluxo de ar que forma vórtices em torno da periferia das asas é bastante pequeno gerando uma instabilidade de fluxo de ar também baixo. Isto é muito importante quando se trata da estabilidade de vibração da asa e também quando se trata de voo em formação ou em grupo. Uma vez que a influência de uma abelha em uma segunda abelha por gerar baixa turbulência se torna também baixo.

A força de batimento que ocorre nas asas das abelhas e também nas asas das aeronaves MAV é dada pela seguinte equação:

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \rho (w^2 R^2) / 4 R b c_d \text{ ou}$$

$$I_{arr} = \frac{1}{2} \rho V^2 R b c_{dd} \frac{3T}{8} - \frac{1}{2} \rho V^2 R b c_{ds} \frac{3T}{8}$$

I_{arr} = impulso de arrasto vertical

c_{dd} = coeficiente de arrasto descendo

c_{ds} = coeficiente de arrasto subindo

T = período de batimento vertical

E o Número de Reynolds é dado pela seguinte equação:

$$Re = \rho V D / \mu$$

$$F_{arr} \geq m \cdot g$$

Como V é baixo e D também é baixo tem-se um número de Reynolds também baixo e uma força de arrasto também pequena, somente necessária para ser maior que o peso, peso este que também é bem pequeno.

Este é o principal motivo no qual o modelo de voo das abelhas não é viável em aves de médio e grande porte, nem em aeronaves de médio e grande porte: SAV (Small Air Vehicles). Pois em aeronaves de médio e grande porte, as velocidades das pás e o comprimento das mesmas são grandes e geram um Número de Reynolds grande o que gera um nível de batimento, ruído e turbulência inviáveis para a aplicação de aeronaves com geometrias grandes e médias.

Imagina-se que este é o motivo para a não existência de animais e aves de médio porte que consigam realizar voo com modelo semelhante ao modelo de voo das abelhas. O modelo de voo das abelhas é totalmente diferente do modelo de voo das águias, dos falcões, dos condores, das gaiivotas, dos morcegos, enfim de todo e qualquer animal alado de médio e grande porte.

Além disso são poucos os animais que realizam o voo pairado. Muitos animais voam planando para baixo e para frente, mas muito pouco são os animais que realizam o voo pairado propriamente dito tal qual as abelhas e os zangões.

Pode-se realizar a simulação numérica das asas flapeadas com baixo número de Reynolds, bastando para isso inferir valores para a equação descrita anteriormente:

Ou seja, afere-se uma frequência de voo de 190 Hz (que é a frequência estimada de batimento médio de voo das abelhas), calcula-se a velocidade de rotação relativa a esta frequência; Executa-se a medição dos valores de raio e de corda média da asa, Afere-se a estimativa de coeficiente de arrasto para cima e para baixo, de acordo com a dinâmica de voo da mesma; E estima-se o peso da mesma, impondo que a força de arrasto resultante tem que ser superior ao peso da aeronaves.

Esta simulação e aferição numérica permite estimar a dinâmica de voo das aeronaves pequenas e de baixo número de Reynolds. Já em relação a aeronaves médias e grandes o número de Reynolds aumenta gerando um valor de turbulência maior e que torna a aeronave inviável do ponto de vista de batimento e torção nas asas das aeronaves SAV.

13.1.1. Geometria da Asa e Movimento em Flap

A geometria da asa das abelhas são consequência física e geométrica do comportamento de movimento de batimento das mesmas. Como elas se mantêm em constante batimento, sua geometria parecida com uma faca arredondada se torna coerente com seu movimento, seja ele de batimento, ou seja ele de rotação. O eixo de rotação fica estendido ao longo da borda de ataque e a espessura da faca arredondada apresenta em sua lâmina a borda de fuga. A dinâmica de batimento e rotação constante permite sua otimização graças a esta geometria semelhante a uma faca arredondada.

Portanto, a borda de ataque da asa das abelhas é representada como uma borda no formato de faca. É interessante notar que a ponta do raio da asa também é estabelecida como uma faca mais aguda que a faca da borda. A faca mais aguda opera também como um perfil de arredondamento, porém mais curta.

Já a borda de fuga da asa exterior é unida a borda de ataque da asa posterior e esta asa posterior também forma uma borda de ataque. E também forma uma borda de fuga na geometria posterior.

Assim, tanto as bordas de ataque das asas exteriores quanto as bordas de ataque das asas interiores formam uma geometria arredondada na borda de ataque. E também formam um modelo arredondado na ponta de asa e também formam uma borda de fuga arredondada no fundo da asa.

Desta forma, a asa das abelhas é totalmente arredondada, tanto na borda de ataque, quanto na ponta de asa e também na borda de fuga. Este arredondamento é muito interessante e permite uma otimização da dinâmica do movimento de flap pois isto gera um melhor comportamento da geometria das asas.

A geometria arredondada da asa torna o fluxo de dinâmica do ar nas mesmas mais suave do que se a geometria fosse quadrada. Uma hipotética geometria quadrada faria com que o sistema de voo, seja das abelhas, como também nas aeronaves MAV, seria estabelecido um fluxo de ar quadrado e, portanto, geraria uma dinâmica de fluxo de ar inadequado e esta inadequação geraria um turbilhão sobre o fluxo de ar.

Este fluxo de ar gera uma instabilidade no voo tanto das abelhas quanto nas aeronaves MAV. Esta instabilidade propõe uma inadequação do fluxo no voo das mesmas. Esta instabilidade no voo das abelhas e das aeronaves MAV gera uma incapacidade de realizar o voo de aproximação das flores e também realiza uma incapacidade de aproximação da colmeia.

Ou seja, a geometria da asa das abelhas e da asa das aeronaves MAV é fundamental para a realização do voo estável das mesmas. A geometria arredondada não pode ser substituída por uma geometria retangular, pois somente uma geometria arredondada consegue propor um voo estável tanto de aproximação para voo VTOL, quanto para voo pairado, ou mesmo voo frontal e de guinada bastante equilibrado e estabilizado.

Uma geometria de asas retangular não tem a capacidade de gerar um voo estável. Ao utilizar-se de asas arredondadas o fluxo de ar opera de forma mais estável, para todo o tipo de voo, incluindo voo VTOL, voo frontal, voo guinado ou voo pairado.

Assim, a geometria arredondada é fundamental para a eficácia de todo o tipo de voo tanto das abelhas como das aeronaves MAV. Sem esta geometria nas asas, o sistema de voo não se torna eficaz, nem viável de ser executado pelas MAV.

Ou seja, as aeronaves MAV precisam ter as asas arredondadas. Somente com as asas arredondadas, que as aeronaves conseguem ser capazes de realizar todo o tipo de voo pré-estabelecido.

Ou seja, somente com a geometria arredondadas das asas das MAV e o movimento de Flap nas mesmas estas para ser capaz de permitir o voo delas totalmente flexível e capaz de realizar todo o tipo de comportamento aéreo e atmosférico.

13.1.2. Propriedades do Fluxo

O fluxo de ar é empurrado para baixo quando a asa realiza batimento vertical para baixo. Em torno das bordas de ataque e de fuga formam-se vórtices de ar que através de um movimento circular empurram a asa em sentido horário. Quando a asa sobe esta posiciona sua borda de ataque para cima e sua borda de fuga para baixo de maneira a minimizar o arrasto vertical. Assim forma-se um fluxo médio de ar pulsado para baixo que também é compensado no comportamento do efeito solo.

Após este movimento vertical para cima o fluxo de ar é empurrado para cima quando a asa realiza batimento vertical para cima. Em torno das bordas de ataque e de fuga formam-se vórtices de ar que através de um movimento circular empurram a asa em sentido anti-horário. Quando a asa sobe esta posiciona sua borda de ataque para baixo e sua borda de fuga para cima de maneira a minimizar o arrasto vertical. Assim forma-se um fluxo médio de ar pulsado para cima.

Portanto, ocorre um impulso médio onde parte do impulso para baixo gera uma diferença de velocidade vertical para cima parte do impulso para cima gera uma diferença de velocidade vertical para baixo; e desta forma, parte do impulso médio de subida gera uma diferença de velocidade vertical para cima.

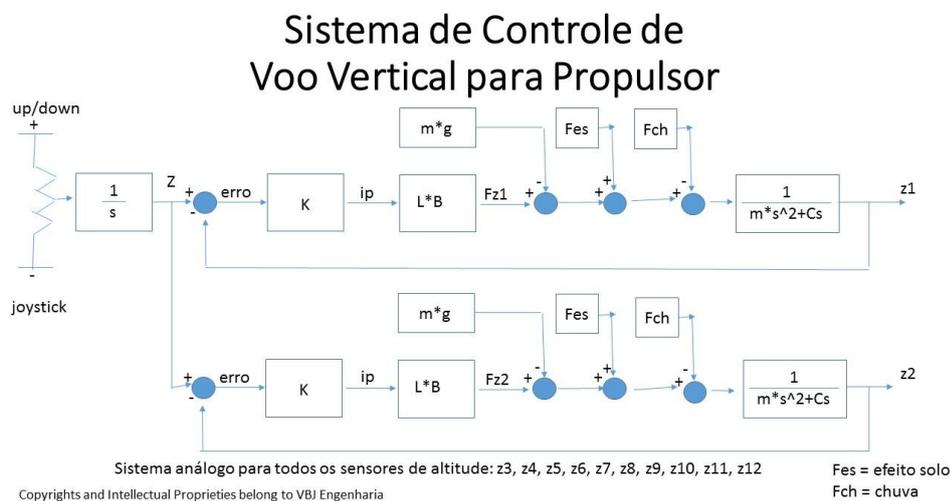
Assim, ocorre um impulso para cima a cada empuxo para baixo, e gera um impulso mínimo para baixo a cada empuxo de asa para cima. Ou seja, para baixo ocorre o arrasto total com a asa disposta na horizontal e para cima ocorre o arrasto de asa com a mesma disposta na vertical gerando u empuxo mínimo de arrasto para baixo.

Ou seja, o fluxo de ar é máximo com a asa disposta na horizontal para cima e é mínima com as asas dispostas na vertical para baixo. Além disto há 2 movimentos de torção, um no setor anti-horário em sua altura máxima (em cima) e um segundo movimento no setor horário em sua altura mínima (em baixo),

Há de se observar também que o fluxo de ar pode ser percebido através da presença de vento horizontal (tanto vento quanto chuva). A presença de vento e de chuva altera as condições normais tanto de voo das abelhas, quanto no voo das aeronaves MAV. Isto altera as propriedades de fluxo do ar.

As aeronaves MAV devem ser capazes de alterar suas condições de voo nestas situações. Ou seja, a Base deve ser capaz de perceber a presença de vento e a presença de voo com chuva e corrigir as condições de malha fechada, pois o modelo de controle da planta se altera com o comportamento de vento horizontal e também de chuva.

A equação de controle da dinâmica de voo deve ser alterada e corrigida pela Base de forma a levar em consideração estes novos cenários de voo. No caso do voo horizontal, as condições de presença de ventos, sejam eles fortes ou fracos, devem ser considerados como um princípio de arrasto horizontal e em relação a presença de chuva, seja ela forte ou fraca, deve ser considerada como um princípio de arrasto vertical, somado ao arrasto vertical da força peso.



13.1.3. Formulação e Mapeamento

As abelhas possuem um par de antenas que permite que elas se comuniquem e se localizem espacialmente em relação a localização a outras abelhas da colmeia. Através de sua capacidade ocular estas também conseguem localizar e reconhecer floradas específicas desejadas. Isto faz crer que as abelhas têm uma capacidade de construir um mapeamento de seu posicionamento na natureza, na floresta e na mata. Sistemas GPS podem fornecer a mesma capacidade de localização para veículos MAV construídos pelo homem.

Ou seja, o sistema GPS instalados nas aeronaves MAV, e enviado para a Base para que esta possa tomar a decisão sobre para qual direção as aeronaves devem prosseguir. Assim, o GPS atua de forma extensiva, com parte das informações instaladas nas aeronaves e outra parte das informações instaladas na Base.

A parte dos sensores do GPS necessita estar instalada nas aeronaves e a parte de tomada de decisão e enviada para as aeronaves fica instalada na Base. A parte dos sensores é suficiente para fazer a leitura do GPS e enviar esta leitura para a Base. Onde esta irá tomar a decisão para onde aeronave deve se deslocar. Ou seja, aeronave opera de forma passiva fazendo a leitura do GPS e enviando a informação para a Base, e a Base atua de forma ativa, definindo qual atitude deve ser

realizada pelas aeronaves MAV.

Outra atividade que as aeronaves executam através da disponibilização do GPS se trata da formulação e mapeamento. No caso das abelhas o mapeamento é realizado para se localizar floradas desejadas e todo tipo de flor que possua pólen em potencial para produzir mel.

Já no caso das aeronaves MAV, a atividade principal a ser executada de formulação e mapeamento está associada à localização de drogas, de tóxicos, de equipamentos radioativos, de bombas em potencial, e ou de qualquer outro material perigoso e de alto risco.

O mapeamento e a comunicação deste mapeamento para a Base e também para outras aeronaves MAV é fundamental para que o voo coletivo, possa vir a providenciar atividades a seguir e futuras em relação a novas estratégias.

A formulação e o mapeamento realizado por uma aeronave MAV e/ou realizada por uma abelha em comunicação com as outras abelhas, capacita as outras aeronaves e às outras abelhas a realizar uma nova estratégia de voo, aproximando-se ou distanciando-se do alvo localizado no mapa construído, no caso das aeronaves MAV, montado no GPS.

Assim, através das aeronaves MAV, os mapas são construídos e enviados para a Base, e esta recebe as informações dos mapas e reconstrói uma nova estratégia de voo para cada uma das aeronaves e envia esta nova estratégia para cada uma das aeronaves MAV para que estas possam executar em malha fechada o voo planejado.

É interessante notar que somente com as informações vindas do GPS é que as aeronaves MAV podem se comunicar com a Base e somente esta pode estudar o mapeamento e tomar as decisões adequadas de forma a propor para as aeronaves uma nova estratégia de voo desejado, seja frontal, seja VTOL, seja pairado, seja guinado.

Como a aeronave MAV possui uma capacidade de processamento e memória muito pequeno, esta não pode realizar o processamento digital, e assim o processamento digital é executado pela Base, pois esta sim tem uma grande capacidade de memória e processamento. Assim, a Base é capaz de armazenar todo o mapeamento, realizar algoritmos de controle e

processar este algoritmo e enviá-lo de volta para cada uma das aeronaves.

Ou seja, as aeronaves são os sensores e os atuadores de voo individuais, enquanto que a Base é o cérebro e o estrategista de voo coletivo, operando de forma simultânea para todas as aeronaves em paralelo. Desta forma, a Base opera planejando e controlando o voo de todas as aeronaves enquanto que cada aeronave se posiciona a si mesma, realizando a leitura através de sensores, filmadoras, máquinas de fotografia, localizadores de tóxicos, localizadores de drogas, etc. Contudo não armazena estas informações, mas sim as envia imediatamente para os radiocomunicadores da Base, para que esta decida o novo planejamento a ser executado.

Uma exploração numérica de parâmetros dependentes de Potência para Voo Ótimo flapeado (de batimento) [17]:

Modelo numérico e simulações numéricas permitem construir e comparar diferentes potências e forças verticais e horizontais para otimizar uma dinâmica de batimento e de rotação para verificar qual geometria atinge um voo ótimo simulado. Estas simulações capacitam aos engenheiros de fabricação para manufaturar o MAV que possui um comportamento ideal, ou ótimo de voo.

O Modelo de batimento é realizado com um impulso vertical para baixo que gera um empuxo para cima e desta forma a aeronave MAV pode executar ou uma subida ou um voo pairado. Este batimento ocorre durante três oitavos do período de oscilação da asa e após a execução do empuxo que empurra a aeronave para cima, gera-se uma torção no sentido horário que torce a asa para a vertical e após esta torção a asa executa a subida que gera um arrasto para baixo, contudo este arrasto é minimizado, pois a asa sobe com arrasto mínimo. Quando a asa atinge sua altura máxima, esta realiza novamente uma torção, no entanto desta vez a execução da torção se realiza no sentido anti-horário e então repete-se o ciclo novamente.

Esta oscilação completa pode ser simulada através de um modelo numérico executado na base e durante esta execução a base envia para a aeronave a dinâmica de voo desejado, seja em voo para cima, quanto em voo pairado, ou mesmo em voo guinado e ou para frente.

De maneira que toda a inteligência de voo se encontra na base e esta envia o voo planejado e desejado para a aeronave MAV que executa o deslocamento de forma passiva. Ou seja, a aeronave MAV executa o plano desejado pela base e exerce este plano realizado pela base.

Ou seja, toda a inteligência de voo se encontra na Base e a execução de voo ocorre de maneira inquestionada pela aeronave.

Já a potência de voo é planejada pela bateria da aeronave que se posiciona na calda da aeronave MAV, posicionada na calda onde fica o ferrão da abelha. Esta bateria pode ser construída por íon de lítio, que se trata de uma bateria que consegue manter a tensão e a corrente de forma contínua e sem executar a diminuição da mesma. Ou seja, utiliza-se uma pequena bateria de íon de lítio para capacitar o voo em longa duração.

Ou seja,

$$V \cdot i = mg \cdot dh/dt + F_h \cdot v_h$$

V = Voltagem da bateria de íon de lítio

i = corrente da bateria de íon de lítio

m = massa da aeronave MAV

g = aceleração da gravidade

dh = diferencial altura de subida

dt = diferencial de tempo

F_h = força horizontal

v_h = velocidade horizontal

A potência elétrica é proporcional à potência de subida mais a potência horizontal de deslocamento. Ou seja, a potência elétrica é proporcional a potência de dinâmica de voo. É importante perceber que a bateria deve ser a menor possível para que possa ficar disfarçada na calda da MAV ou seja na posição equivalente à da calda e do ferrão.

A bateria deve estar disfarçada pela calda, para que a aeronave MAV possa se posicionar de maneira a esconder a bateria dentro da calda no local do ferrão. A bateria deve ficar escondida e disfarçada na posição da calda. Ou seja, como a bateria precisa ser muito pequena a capacidade tempo de voo também é pequena e precisa ser recarregada de tempo em tempo de maneira que possa conseguir voar em vários intervalos intermitentes. O que significa que a bateria precisa ser recarregada várias vezes entre um voo planejado e outro. Como a bateria é de íon de lítio que opera com boa relação peso potência em relação a outros tipos de bateria, significa que em relação a outras baterias a bateria da MAV de íon de lítio possui a melhor condição de voo pairado, vertical, frontal e guinado.

17.1.1. Parâmetros de Interesse de Geometria e Cinética

Pode-se também simular diferentes geometrias de asa e de comportamentos cinéticos de maneira comparar alterações de parâmetros de interesse como por exemplo comprimento, largura e espessura das asas, variação de ângulo de ataque máximo e mínimo, alteração de frequência, alteração de amplitude máxima e mínima, peso do esqueleto da asa, variação da curvatura de faca da asa, entre outros.

Ou seja, as asas das aeronaves MAV podem possuir diferentes geometrias, no entanto, pensamos que as asas das abelhas possuem uma geometria ótima e cabe ao engenheiro projetista de asas de aeronaves MAV serem o mais próximo possível da geometria das asas das abelhas. Ou seja, deve-se imitar com o máximo de fidelidade possível o comprimento da asa, a largura, a espessura, a variação de ângulo de ataque máximo e mínimo, a alteração de frequência, a alteração de amplitude máxima e mínima, o peso do esqueleto da asa, a variação da curvatura de faca da asa, entre outras características geométricas e físicas.

Ou seja, quanto mais próximo das características técnicas e geométricas ao das asas das abelhas, mais próxima as asas das aeronaves possuirão seu comportamento ótimo. Ou seja, consideramos que as asas das abelhas possuem características ideais de geometria e de processamento de batimento flapeado e de voo.

Em relação às características de cinesse e voo em velocidade horizontal e vertical também consideramos que as asas das abelhas possuem suas características ótimas. Ou seja, tanto em relação à geometria quanto em relação à energia cinética o modelo geométrico e as características técnicas das asas das abelhas deve ser imitado e copiado com o máximo critério e fidelidade de operação.

Portanto, afirmamos que as características técnicas e geométricas, além das características de energia cinética devem ser imitadas de maneira a copiar com fidelidade os princípios de construção das asas. E também deve-se procurar imitar as características de aerodinâmica de voo e de peso das aeronaves MAV.

Assim os parâmetros de geometria e de cinesse devem imitar com o máximo de êxito possível de maneira a copiar as mesmas capacidades de movimento dinâmico vertical, pairado, horizontal e de guinada. Com toda certeza, caso se construa asa e corpos diferentes dos modelos das abelhas a operação de voo não possuirá as características ótimas de voo das abelhas. Ou seja, consideramos que o voo das abelhas possui características biológicas que tornam seu voo otimizado quando comparado com outras geometrias e outras características biológicas de voo.

Quanto mais parecidas e próximas das asas e do corpo das aeronaves MAV, mais próxima será a dinâmica de voo desta em relação ao comportamento de voo das abelhas. O que significa que quanto mais similar forem as características e as geometrias das asas das MAV em relação as características e geometrias de voo das abelhas, mais próximo do comportamento ideal de voo.

Pensamos que a Engenharia Biológica da Natureza deve ser imitada com o máximo critério de fidelidade possível. O que significa que a Engenharia Biológica da Natureza pode e deve ser copiada, pois pensamos que estas condições são otimizadas em relação a outras condições de

geometria e de cinese.

Ou seja, desejamos estudar a Engenharia Biológica da Natureza de maneira a aprender princípios de geometria e de cinese com a natureza onde devemos imitar para que as técnicas de dinâmica de voo possam ser ideais nas aeronaves MAV.

Portanto os modelos que imitam a natureza devem ser superiores ao modelo de voo de aeronaves drone de pequeno porte que utilizam mini-rotores também de pequeno porte. Ou seja, se estudamos as características de voo e de dinâmica das aeronaves MAV que imitam as abelhas devem ser superiores às características de voo das mini-aeronaves drone.

Ou seja, os veículos MAV que imitam a biologia e o voo das abelhas são preferenciais em relação aos veículos drone de pequeno porte que usam mini-rotores.

17.1.2. Frequência de Flap

Os modelos matemáticos também permitem a simulação maior ou menor da frequência de oscilação (batimento e rotação) das asas. Pois, quanto maior for a frequência de oscilação, maior serão as forças verticais e horizontais. Contudo, existe também um limite de frequência para não criar ressonância nas partes mecânicas das aeronaves MAV e também há um segundo limite em relação a número de Mach. O terceiro limite está associado ao surgimento de ruído não desejado.

Ou seja, possuímos nas aeronaves MAV 3 restrições: uma em relação a frequência de ressonância, outra em relação ao número de Mach e um terceiro em relação à vibração e ruído. Para frequências maiores maior será o empuxo de voo vertical ou horizontal, contudo deve-se observar os limites de ressonância, de número de Mach e de ruído.

Ou seja,

$$F_v \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot R^3 / 4 \cdot b^3 \cdot T / 8 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot R^3 / 4 \cdot b \cdot c_d^3 \cdot T / 8 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_h^2 \cdot R_h^3 / 4 \cdot b_h \cdot c_l^3 \cdot T / 8$$

$$I_v = F_v \cdot dt$$

I_v = impulso de voo vertical

F_v = força vertical

dt = diferencial de tempo

ρ = densidade do ar

w = velocidade de rotação de voo

R = raio da asa

b = corda da asa

c_d = coeficiente de arrasto

T = período de oscilação

$$F_h \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot R^3 / 4 \cdot b \cdot c_l^3 \cdot T / 8 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_h^2 \cdot R_h^3 / 4 \cdot b_h \cdot c_l^3 \cdot T / 8 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_h^2 \cdot R_h^3 / 4 \cdot b_h \cdot c_d^3 \cdot T / 8$$

$$I_h = F_h \cdot dt$$

I_h = impulso de voo horizontal

F_h = força horizontal

dt = diferencial de tempo

ρ = densidade do ar

w_h = velocidade de rotação de voo das asas posteriores para voo horizontal

R_h = raio da asa posterior

b_h = corda da asa posterior

c_{dh} = coeficiente de arrasto horizontal

T = período de oscilação

O que significa que as forças verticais são impulsionadas pelas asas exteriores e as forças horizontais são impulsionadas pelas asas posteriores. Ou seja, o impulso vertical é executado por um par de asas exteriores e o impulso horizontal é executado pelo par de asas posteriores.

Como o impulso somente ocorre em $3/8$ do período de oscilação e o arrasto também somente ocorre em outro período de oscilação equivalente a outros $3/8$ do período, contudo como o arrasto e empuxo para cima é maior que o arrasto e o empuxo para baixo, devido à diferença de coeficiente de arrasto entre a asa na horizontal e a asa na vertical, gera-se um empuxo resultante para cima.

Os outros $2/8$ da oscilação realizam torção anti-horária e torção horária não gerando um arrasto vertical nem horizontal, pois a torção gera um empuxo resultante nulo. Ou seja, durante $3/8$ da oscilação gera-se empuxo vertical para cima; durante outros $3/8$ da oscilação gera-se um empuxo vertical para baixo; e durante $2/8$ da oscilação gera-se um empuxo nulo.

17.1.3. Amplitude de Flap

Modelos Matemáticos de simulação de amplitude de rotação estão associados à capacidade de voo horizontal para frente e para trás e também à capacidade de realizar voo em guinada. Ao aumentar a amplitude de rotação da asa para arrastá-la na horizontal, maior serão sua capacidade de realizar arrasto na horizontal para frente e para trás e maior será sua capacidade de realizar arrasto em guinada horária e anti-horária.

A amplitude de flap está relacionada com o comprimento da asa, ou seja, está relacionada com o raio da asa de voo vertical R e com o raio da asa de voo horizontal R_h que ambas são elevadas ao cubo no cálculo do empuxo horizontal ou vertical. Ou seja, o raio da asa é elevado ao cubo para realizar o impulso, seja o impulso horizontal como vertical.

Quanto maior for a amplitude da asa, maior será o empuxo de impulso vertical e horizontal. Contudo, deve-se limitar o tamanho da asa para que ela não exceda as 3 condições de restrição que são os limites de ressonância da asa, de número de Mach da asa e de ruído de vibração.

Assim a dimensão das asas deve ser quanto maior melhor, porém com o limite de ressonância da asa, de número de Mach da asa e de ruído de vibração. Ou seja, quanto maior a asa com seus devidos limites e restrições maior serão os empuxos vertical e horizontal.

A amplitude de raio da asa gera a amplitude de flap da mesma. Quanto maior a amplitude de flap, maior será a intensidade do impulso, seja de voo vertical, seja de voo horizontal.

O modelo de impulso que trabalha com a oscilação de $3 \cdot T/8$, contudo pode também ser modelado com 4 movimentos de $T/4$ ou seja $2 \cdot T/8$; contudo ambos os modelos geram impulso vertical resultante para cima, pois o movimento de arrasto e movimento para cima é maior que o movimento de arrasto para baixo.

A amplitude de flap é fundamental para gerar o impulso, seja para cima, ou pairado, quanto para frente ou em guinada. Quanto maior for a amplitude de flap, maior será a amplitude de empuxo vertical ou horizontal ao cubo. O que significa que o dobro de asa, gera amplitude de empuxo oito vezes maior.

Além disso a asa tem que ser resistente e deve ser capaz de suportar tanto a força de flexão quanto a força de torção da asa. O que significa que a força de batimento vezes o braço da asa tem que ser capaz de suportar o momento fletor na raiz da asa. Do mesmo jeito que a força de torção vezes a metade do batimento da asa tem que ser capaz de suportar o momento torsor também na raiz da asa.

Ou seja, a amplitude de flap é limitada pelo momento fletor na raiz da asa e a corda da asa é

limitada pelo momento torsor da mesma. Quanto maior a amplitude da asa, maior será o momento fletor e quanto maior a corda da asa, maior será o momento torsor da mesma. Estas duas condições limitam as características geométricas de amplitude de corda da asa.

Portanto, são cinco características limitantes nas asas, que são ressonância da asa, número de Mach da asa, ruído de vibração da asa, momento fletor e momento torsor. Dentro deste cenário de limitação da asa, quanto maior o raio e maior a corda da asa, melhor e mais intensa será sua força de voo vertical e horizontal.

Desta forma a amplitude de flap da asa e a corda devem ser a maior possível, dentro deste cenário de 5 restrições. Nestas condições de restrição geométrica e de tensão e de torção mecânica estabelece-se que esta deve permitir o melhor cenário de força seja ela vertical quanto horizontal.

17.1.4. Segundo Harmônico de Flap

Em todo modelo físico de vibração surge não somente a vibração na frequência fundamental, mas também ocorre o surgimento de outros harmônicos. Nas asas das abelhas ou em veículos MAV que imitem as abelhas é importante estudar não somente a frequência fundamental, mas também pelo menos o seu segundo harmônico. Isto significa que todo o cuidado realizado com frequências fundamentais na vibração da estrutura, também deve ser realizado com relação a frequência do segundo harmônico. Cuidado com ressonância, cuidado com ruído e cuidado com Número de Mach.

Admite-se que a frequência de batimento das abelhas opera com frequência em torno de 190Hz. Isto significa que a frequência fundamental opera tanto para baixo, quanto para cima e em torção horária e anti-horária. Isto posto opera-se também nas asas exteriores, e também opera

para frente e para trás e também em torção nas asas posteriores.

Pensando no segundo harmônico tanto nas asas exteriores quanto nas asas posteriores ocorre a presença de $4/3$ de f_f (f_f = frequência fundamental) ou seja, 253 Hz; Esta é a frequência de batimento do segundo harmônico. Este segundo harmônico trabalha apoiado no corpo da abelha, ou no corpo da aeronave MAV e sua frequência também gera ressonância deste harmônico, gera ruído vibracional e gera também número de Mach.

Quanto maior a frequência do segundo harmônico, ou mesmo do terceiro harmônico, maior será a frequência de ressonância, maior será a vibração com ruído e também mais próximo do número de Mach no batimento das asas.

Devemos lembrar que a frequência do segundo harmônico ocorre com o dobro da frequência fundamental de batimento. E o terceiro harmônico ocorre com o triplo da frequência fundamental de batimento.

Tanto a frequência de ressonância, quanto a vibração do ruído e também a operação do número de Mach são frequências indesejadas e são prejudiciais não somente para as abelhas, mas principalmente para as aeronaves MAV.

Desta forma o projeto de engenharia aeronáutica das aeronaves MAV deve prever a ocorrência do segundo e do terceiro harmônicos de maneira a projetar e construir suas asas para suportar e suprimir as frequências do segundo e do terceiro harmônicos procurando minimizar seus efeitos de batimento durante estas frequências.

Como as frequências de batimento do segundo harmônico depende exclusivamente da frequência da operação da asa deve-se na construção das asas das MAV aumentar a resistência da estrutura da asa de maneira que durante a operação do segundo harmônico a asa exercita uma resistência superior de maneira que a atuação da flexão da asa na frequência do segundo harmônico tenha sua flexão minimizada de maneira a atenuar o comportamento fletor da dobra.

O segundo harmônico gera uma frequência superior de batimento, uma vez que tanto a força vertical quanto a força horizontal são resultados da multiplicação da velocidade angular de

batimento ao quadrado, ao exercer uma força vertical e/ou uma força horizontal, estas forças são realizadas com o quádruplo de sua intensidade.

Ou seja, o dobro da frequência de batimento construído pelo segundo harmônico, gera o quádruplo da intensidade da força de batimento.

O que significa que se de um lado o segundo harmônico gera problemas com ressonância, com ruído e com Número de Mach, existe um fator positivo que é o aumento das forças de empuxo vertical e horizontal utilizando-se a mesma energia propulsora para batimento.

Desta forma o segundo harmônico possui características positivas e também negativas. Cabe ao engenheiro projetista das MAV ponderar sobre estas condições negativas e positivas.

17.1.5. Cinemática de Flap

Assim, o modelo cinemático de batimento e rotação das asas das abelhas pode ser simplificado através de 8 fases como mostrado nos gráficos a seguir, ou também pode ser modelado como duas frequências coalescentes de batimento e de rotação. Onde a frequência de batimento representa a vibração vertical da asa; e a frequência de rotação representa a vibração de rolamento de asa.

Ou seja, a cinese e movimento das asas ocorrem trabalhando com estes 4 movimentos, formando 1 tempo com torção anti-horária, 3 tempos com flexão para baixo, 1 tempo com torção horária e 3 tempos com flexão para cima.

O modelo também pode ser construído com 4 fases, sendo formando 1 tempo com torção anti-horária, 1 tempo com flexão para baixo, 1 tempo com torção horária e 1 tempo com flexão para

cima.

O modelo estudado com maior afinco é o de 8 fases, ou seja, 8 tempos descrito anteriormente. A velocidade de batimento da asa é reconhecida como w (velocidade de batimento angular) e todas as forças de batimento vertical e horizontal utilizam a velocidade w como fator de multiplicação ao quadrado de intensidade das forças.

Ou seja, todo o modelo de voo pairado, de voo frontal, de voo vertical e de voo guinado é função e dependência direta da velocidade de batimento angular ao quadrado. O que significa que se não ocorrer o batimento não ocorre o voo, seja de qual maneira for.

Desta forma cinemática das asas gera cinemática do corpo, tanto do corpo das abelhas, como do corpo das aeronaves MAV. Não há dinâmica de voo das abelhas nem das MAV caso não haja dinâmica de voo das asas das mesmas. Dinâmica das asas implica em voo das aeronaves.

Esta condição de batimento vertical e horizontal é totalmente diferente das tecnologias de asa fixa e de asa rotativa planejada e construída pelo homem até atualmente, tanto nos aviões, quanto nos helicópteros e mesmo nos drones.

A condição de cinemática de flap nas asas cria um novo modelo de operação para aeronaves de pequeno porte. Pequeno porte, pois para asas de grande porte ocorre uma restrição em relação ao comprimento das mesmas relativos ao momento de inércia das asas e ao número de Mach na extremidade dos rotores.

Isto em tese pode explicar porque as asas dos insetos são diferentes das asas das aves. Enquanto que as asas das abelhas realizam batimento em alta frequência, as asas das aves realizam batimentos em baixa frequências porém com extensão das asas variando de extensão. Encolhendo quando sobe e estendendo quando desce.

Desta forma tanto nas abelhas quanto nas aeronaves MAV a cinemática de flap das asas se tornam um critério absolutamente fundamental para que as aeronaves e as abelhas executem seu voo desejado de forma planejada e adequada.

É importante notar que o batimento vertical não ocorre sozinho, mas trabalha também com uma torção horária e uma anti-horária e também com a ocorrência de um batimento horizontal também de sua torção. Quando falamos de torção pode também ser entendido rotação.

Estes movimentos sincronizados uns com os outros permite que as aeronaves MAV venham a executar um movimento de voo muito parecido com o voo das abelhas. Ou seja, batimento e torção vertical e horizontal permite que as MAV exerçam sua condição desejada de voo seja horizontal, seja vertical, ou mesmo pairado e também VTOL.

Não devemos esquecer da condição de decolagem e pouso na vertical – VTOL, pois este é um princípio fundamental para localização de drogas, tóxicos, armas, bombas e outros objetos de risco que se desejam serem localizados pelas aeronaves MAV. Como a localização de drogas, tóxicos, armas, bombas e outros objetos perigosos é um dos principais objetivos das aeronaves MAV, estas devem ser capazes de pousar e de decolar em qualquer superfície, subindo e descendo na vertical.

17.1.6. Asa articulada

Assim, cada asa da abelha possui duas articulações que podem ser imitadas através da implementação de 2 servo-motores na raiz de cada asa dos MAV; ou também pode ser implementado através de 2 sistemas piezoelétricos que venham a desempenhar a capacidade de vibração mecânica das mesmas pela estimulação elétrica.

Ou seja, cada asa dos MAV possui na sua raiz uma articulação piezoelétrica e também uma outra articulação piezoelétrica na extremidade posterior onde inicia a asa posterior. Desta forma, em cada asa há 2 articulações piezoelétrica: uma na base da asa exterior e uma segunda na asa posterior.

No caso das abelhas existe dois tecidos de articulação, que realiza o movimento de batimento e de torção, do MAV nas asas exteriores; existe também um outro tecido de articulação

na raiz das asas exteriores. Do mesmo jeito, através de sistemas piezoelétricos, ocorre uma articulação na base das asas exteriores e uma segunda articulação na base das asas posteriores (na extremidade das asas exteriores).

Cabe observar que as asas articuladas são fundamentais para a execução de velocidade angular de batimento e de torção (w), pois sem esta velocidade angular não ocorrem a força vertical nem a força horizontal e conseqüentemente não ocorre o deslocamento das abelhas nem o deslocamento das aeronaves MAV.

Assim o deslocamento horizontal, de guinada, vertical, pairado e VTOL são proporcionais ao quadrado de w e estas realizam as forças vertical e horizontal, pois são diretamente dependentes da velocidade angular de batimento ao quadrado.

Se não há batimento e torção, não há voo vertical nem voo horizontal. O que significa que as asas articuladas são elementos necessários e mandatários para que ocorra o voo em todas as direções.

No caso das abelhas, as asas possuem um esqueleto que se estende ao longo da asa e distribuído na própria. Já nas aeronaves MAV este esqueleto não é necessário, contudo a asa deve ser dimensionada de maneira a suportar as forças verticais, horizontais e de torção.

Ou seja, nas asas das MAV estas não dependem de esqueleto articulado, porém possuem as articulações piezoelétricas que executam o batimento e a torção, tanto nas asas exteriores quanto nas asas posteriores e não necessitam de esqueleto articulado nem flexível.

O que ocorre nas aeronaves MAV é o fato de que o batimento e a torção vertical e horizontal são suficientes para executar o voo vertical, de guinada, pairado, VTOL e horizontal. E além disso, com o correto dimensionamento das asas estas suportam as forças verticais e horizontais sobre os pares de asas.

Desta forma as asas articuladas nas abelhas e nas aeronaves MAV são suficientemente resistentes de maneira que suas articulações no caso das asas das abelhas e a estrutura mecânica no caso das asas das aeronaves MAV executam de maneira a suportar tanto as forças quanto as dinâmicas de articulação.

Isto significa que não basta dimensionar a espessura das asas, mas também é necessário dimensionar a espessura das articulações piezoelétricas tanto na base das asas exteriores quanto na base das asas interiores.

Ou seja, tanto as asas das aeronaves MAV quanto as articulações das mesmas precisam ser dimensionadas de maneira a suportar tanto as forças verticais e horizontais, mas também suas fadigas. A fadiga precisa ser dimensionada de forma adequada devido à alta frequência de batimento.

O que significa que a fadiga gerada pelo batimento e pela torção precisa ser construída de forma adequada, de maneira que as asas e as articulações precisam suportar seus movimentos e suas operações.

Estudos experimentais de aerofólios flapeados para extração de energia [19]:

A capacitação para extrair energia de aerofólios com batimento está associada à pressão dinâmica que o movimento da asa vertical que realiza contra a atmosfera e também está associada ao tamanho da área que capta esta pressão atmosférica de maneira a tornar a dinâmica do aerofólio mais eficaz, pois consegue transformar a pressão dinâmica em força em movimento. Força e movimento em conjunto geram energia. Assim, pode-se dizer que quanto maior a velocidade de arrasto do aerofólio, maior será sua pressão aerodinâmica e maior será sua força, por maior que seja sua área, e em consequência desta, maior será sua energia, pois esta força gerará movimento.

$$F_h = \frac{1}{2} \rho w^2 R^2 / 4 R^2 b h - \frac{1}{2} \rho w^2 R^2 / 4 R^2 b h c_d - \frac{1}{2} \rho w^2 R^2 / 4 R^2 b c_l$$

$$F_v = \frac{1}{2} \rho w^2 R^2 / 4 R b - \frac{1}{2} \rho w^2 R^2 / 4 R b c_d + \frac{1}{2} \rho w^2 R^2 / 4 R b c_l$$

F_h = força horizontal

F_v = força vertical

$$S = R \cdot b$$

$$E_{ch} = F_h \cdot d_h$$

$$E_{cv} = F_v \cdot d_v$$

E_{ch} = energia cinética horizontal

d_h = deslocamento horizontal

E_{cv} = deslocamento vertical

d_v = deslocamento vertical

Ou seja, quanto maior a área S, maior será as forças horizontais e verticais e maior será sua energia cinética de movimento. Quanto maior for a velocidade angular, maior será sua pressão vertical e horizontal que gera energia cinética que permite gerar movimento vertical e horizontal. Ou seja, a energia cinética é tanto maior quanto maior for as forças verticais e horizontais e de deslocamento horizontal e vertical.

Pode-se realizar uma série de estudos experimentais de aerofólios flapeados que permitem a capacitação de energia cinética, seja energias de voo horizontal quanto energias de voo vertical. A energia cinética pode ser apresentada com variáveis demonstrada abaixo:

$$E_{ch} = \frac{1}{2} m \cdot v_h^2$$

$$E_{ch} = \frac{1}{2} F_h \cdot d_h$$

$$E_{ch} = \frac{1}{2} m \cdot \frac{d_h}{dt}^2 \cdot d_h$$

E_{ch} = energia cinética horizontal

m = massa do sistema

v_h = velocidade horizontal

$$w_h = v_h/R$$

F_h = força horizontal

dh = deslocamento horizontal

dt = diferencial de tempo

$$E_{cv} = \frac{1}{2} * m * v_v^2$$

$$E_{cv} = \frac{1}{2} * F_h * dv$$

$$E_{cv} = \frac{1}{2} * m * dv/dt^2 * dv$$

E_{cv} = energia cinética vertical

v_v = velocidade vertical

$$w_v = v_v/R$$

F_v = força vertical

dv = deslocamento vertical

O que significa que a extração de energia gerada pelo batimento e torção dos flaps das asas ocorre devido ao movimento cinético que as forças verticais e horizontais provocam sobre as asas e sobre os aerofólios dos flaps. Quanto maior a intensidade das forças, maior será sua aceleração e maior será sua velocidade de movimento e maior será sua energia cinética de operação vertical e horizontal.

19.1.1. Extração de Potência

Se se deseja extrair potência de um aerofólio deve-se realizar a combinação de força de arrasto ou da força de sustentação com o mecanismo síncrono de aumento de área do aerofólio. Quanto maior a área do aerofólio e maior a pressão aerodinâmica provocada pela velocidade de proa, maior será sua força resultante e consequentemente maior será a potência extraída. Com este princípio pode-se extrair potência de empuxo, potência de sustentação, potência de curvatura e potência de frenagem aerodinâmica.

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

Pensando desta maneira todos os movimentos das asas refletem-se em movimentos de aerofólios e permitem que a asa ou o aerofólio transforme movimento de batimento em dinâmica de energia útil para deslocamento.

Ou seja, o aerofólio das asas das abelhas assim como o aerofólio das asas das aeronaves MAV executam e realizam sua dinâmica de voo, baseada na dinâmica de empuxo, de sustentação, de curvatura e de frenagem.

Todas as forças das asas são proporcionais à densidade do ar, à velocidade angular de batimento ao quadrado, ao raio da asa, à corda média da asa e ao coeficiente de arrasto no caso de arrasto e coeficiente de sustentação no caso de sustentação e empuxo.

Esta extração de potência é dada pela força e torque de batimento multiplicada pela velocidade angular de batimento.

Ou seja,

$$P_v = F_v * v_v$$

$$P_h = F_h * v_h$$

$$F_v = m * dv_v / dt$$

$$F_h = m * dv_h / dt$$

$$v_v = \int (dv_v / dt) dt$$

$$v_h = \int (dv_h / dt) dt$$

onde

$$P_v = \text{potência de voo vertical}$$

F_v = força vertical

v_v = velocidade de voo vertical

P_h = potência de voo horizontal

F_h = força horizontal

v_h = velocidade de voo horizontal

m = massa da aeronave

dv_v/dt = aceleração vertical

dv_h = aceleração horizontal

Desta forma a frequência de batimento operada piezoelectricamente gera a força (vertical e/ou horizontal); esta força gera a aceleração (vertical e/ou horizontal); e a aceleração gera a velocidade (vertical e/ou horizontal). A multiplicação da força vezes a velocidade define a potência útil de operação, seja das abelhas, seja das aeronaves MAV.

19.1.2. Tanque pequeno e carga

O problema do tanque e da carga de transporte dos MAV precisam ser pequenos faz com que sua capacidade de desempenho de missão seja limitada a missões de curta duração, uma vez que a capacidade de energia transportada é pequena e limitada. Como veículos MAV possuem limite de carga e de combustível, o estudo de novas formas de energia eletromecânica precisa ser estudado de maneira a tornar os voos mais longos e suas missões mais efetivas para distâncias maiores.

A bateria das aeronaves MAV podem e devem serem instaladas na posição anatômica do

ferrão das abelhas. As dimensões são bem pequenas e exigem que as baterias fiquem disfarçadas pela geometria do ferrão.

Atualmente a melhor bateria com relação peso potência se trata das baterias de íon de lítio, que hoje são intensamente utilizadas hoje nos aparelhos celulares. Desta forma a autonomia de voo das aeronaves MAV é bastante restrito a alguns minutos.

A autonomia das baterias é qualificada pela amperagem hora que ela consegue trabalhar. As baterias de íon de lítio operam normalmente com 3,7 Volts e as baterias maiores operam com 8,800 mAh.

$$V_{Bat} = 3,7 \text{ V}$$

$$En_{Ac} = 8,800 \text{ mAh}$$

$$Pes_{Bat} = 0,045 \text{ kg}$$

V_{Bat} = voltagem de trabalho da bateria

En_{AC} = energia acumulada em amperes hora

Pes_{Bat} = Peso da bateria

Não somente a bateria precisa ser pequena e é limitada a poucos gramas e à pequena geometria, mas também sua capacidade de carga também é muito reduzida. No caso das abelhas, estas necessitam carregar pólen da florada para a colmeia.

Já as aeronaves MAV precisam ser capazes de carregar alguns recursos tais como máquina de filmagem, máquina de fotografia, localizador físico químico de drogas, sensores de tóxicos, localizadores de bombas, localizadores de armas, sejam armas físicas, como armas químicas. Todos estes recursos precisam ser posicionados nas aeronaves MAV de maneira a permitir a operação desejada para a qual a MAV foi construída e planejada.

No caso de incapacidade de realizar cargas totais desejadas, deve-se operar com as

aeronaves MAV com apenas um ou dois tipos de dispositivos de localização. Ou seja, opera-se com 4 ou 5 aeronaves MAV, simultaneamente, com cada uma com um atributo seu específico. O que significa que a base opera com 4 ou 5 aeronaves simultaneamente.

A necessidade de se trabalhar com baterias e cargas pequenas acaba por ser neutralizada pela utilização de mais de uma aeronave MAV em conjunto e com operação sincronizada. Sincronismo este que é planejado e controlado pelos algoritmos de operação disponibilizado na base.

Infelizmente as aeronaves MAV possuem uma limitação muito grande em relação à capacidade de realizar carga de objetos distribuídos no solo, ou no ambiente onde executa-se o voo de operação e de missão.

Para se realizar uma capacidade de carga maior, a aeronave MAV precisa ser maior e assim precisa ter uma asa com raio e corda média maior e não reduzir a velocidade angular de batimento, mas estas condições precisam ser também limitadas em relação das condições de restrição de batimento avaliados no capítulo de Amplitude de Flap.

19.1.3. Controle de Movimento

O sistema de controle de voo das abelhas e dos veículos MAV são baseados no modelo de frequência e amplitude de batimento e rotação de suas asas. Assim, um modelo de controle precisa ser construído utilizando-se variáveis acopladas de vibração, modelando-se uma matriz de dinâmica de controle fomentado pelo modelo tradicional $dx/dt = Ax + Bu$, onde dx/dt é o vetor de derivadas de posição, A é a matriz de inércia, x é o vetor de posição, B é a matriz de entrada e u é o vetor de entrada.

Este modelo permite executar o movimento e o controle de voo onde a matriz de inércia A e o vetor da posição x ficam hospedados na base; já a matriz de entrada dinâmica também fica hospedada na base enquanto que o vetor de entrada dinâmico é calculado na base e enviado para a aeronave MAV para que esta execute sua função dinâmica de voo.

Este princípio permite que todo o controle de movimento e de voo das aeronaves MAV sejam executados de maneira a contento, onde dx/dt é o vetor de velocidade, enquanto que o vetor x é o vetor de posição; Já a Matriz A opera como uma matriz de inércia, e o vetor u opera como vetor de entradas e a Matriz B, opera como uma matriz de entrada.

O vetor dx/dt pode incluir as variáveis de velocidade e de aceleração dx/dt , dy/dt , dz/dt , d^2x/dt^2 , d^2y/dt^2 , d^2z/dt^2 , w_x , w_y , w_z , dw_x/dt , dw_y/dt , dw_z/dt ;

Onde

dx/dt = velocidade na direção x

dy/dt = velocidade na direção y

dz/dt = velocidade na direção z

d^2x/dt^2 = aceleração na direção x

d^2y/dt^2 = aceleração na direção y

d^2z/dt^2 = aceleração na direção z

w_x = velocidade angular em torno do eixo x

w_y = velocidade angular em torno do eixo y

w_z = velocidade angular em torno no eixo z

dw_x/dt = aceleração angular em torno do eixo x

dw_y/dt = aceleração angular em torno do eixo y

dw_z/dt = aceleração angular em torno do eixo z

Já o vetor u opera com

w_x = velocidade de batimento angular da asa na direção de empuxo x

w_y = velocidade de batimento angular da asa na direção de empuxo y

w_z = velocidade de batimento angular da asa na direção de sustentação z

w = vetor resultante da soma vetorial de w_x , w_y , w_z

onde

$$T_{aux} = J_x \cdot dw_x/dt$$

$$T_{aui} = J_y \cdot dw_y/dt$$

$$T_{auz} = J_z \cdot dw_z/dt$$

T_{aux} = torque em torno da direção x

T_{aui} = torque em torno da direção y

T_{auz} = torque em torno da direção z

J_x = momento de inercia em torno da direção x

J_y = momento de inercia em torno da direção y

J_z = momento de inercia em torno da direção z

$$w_x = w_{x0} + dw_x/dt \cdot dt$$

$$w_y = w_{y0} + dw_y/dt \cdot dt$$

$$w_z = w_{z0} + dw_z/dt \cdot dt$$

Ou seja, o modelo $dx/dt = Ax + Bu$ é bastante coerente e pode ser aplicado para a modelagem da dinâmica de voo.

19.1.4. Sensor de Força

Sistemas MAV precisam ser capazes de medir seu deslocamento espacial e sua força horizontal, vertical e de guinada em tempo real. Para isso, pode-se utilizar-se de Sistemas GPS que monitoram sua posição geográfica o tempo todo e derivando-se de sua posição geográfica consegue-se calcular suas velocidades no plano horizontal. Pode-se também medir sua altitude utilizando-se de altímetros eletrônicos que derivam para calcular sua velocidade vertical para cima ou para baixo.

Estes sensores tanto via GPS quanto via altímetro digital são fundamentais para a execução correta do voo horizontal e vertical desejado. Para se poder medir as condições geométricas de operação das aeronaves estas precisam ser dotadas de sensores tipo pitot para medição de

velocidade e controles geográficos tipo GPS; contudo sensores GPS ocupam uma quantidade enorme de memória e por isso não devem ser armazenadas nas MAV, mas sim na base.

Ou seja, as aeronaves MAV monitoram em tempo real através de sensores pitot sua velocidade de deslocamento nos eixos x , y e z e informam em tempo real estas velocidades de forma que a base passa a monitorar a posição das aeronaves utilizando-se de GPS instalado na base.

Do mesmo jeito que se mede as velocidades horizontais das aeronaves MAV, as mesmas podem medir suas acelerações e conseqüentemente, sabendo-se suas massas se torna efetivo saber-se suas Forças Horizontais (F_x , F_y e F_z) nas direções x , y e z ; e ao saber o valor de suas velocidades angular w_x , w_y e w_z . E sabendo-se o valor da aceleração angular dw_x/dt , dw_y/dt e dw_z/dt , sabe-se o valor do torque T_{aux} , T_{auy} e T_{auz} .

O que significa que ao se saber as condições geométricas e geográficas medidas pelos sensores pitot e enviadas estas informações para a base, a base consegue calcular suas forças horizontais e suas torções.

Ao se medir os sensores de altitude, da mesma forma a base consegue-se medir as forças verticais para cima e para baixo.

Portanto, sabendo-se as condições de voo (altitude, velocidade e aceleração) a base consegue calcular a intensidade de voo e sua posição geográfica e sua altitude, para isso, basta um pitot na direção x , outro na direção y , um terceiro na direção z e mais um sensor de altitude.

Ou seja, os sensores de força não operam diretamente, mas sim indiretamente através dos sensores de velocidade horizontal e de altitude. Os sensores de velocidade horizontal geram variáveis de aceleração horizontal, que geram intensidade de força nas direções das acelerações.

Enquanto que os sensores de altitude geram posições que passam a controlar a velocidade de altitude e em seguida controlam a aceleração de altitude e conseqüentemente controla-se a força vertical.

Ou seja, sensores de força não operam diretamente, mas sim através das derivadas dos sensores de movimento de velocidade e de posição. As derivadas das velocidades geram acelerações e as intensidades das acelerações geram a intensidade das forças em todas as direções.

Assim sabendo-se o deslocamento x , y e z e as rotações dw_x , dw_y e dw_z , sabe-se a intensidade das forças e dos torques como segue abaixo:

$$F_x = m \cdot d^2x/dt^2$$

$$F_y = m \cdot d^2y/dt^2$$

$$F_z = m \cdot d^2z/dt^2$$

$$T_{aux} = J_x \cdot d^2w_x/dt^2$$

$$T_{a_y} = J_y \cdot d^2w_y/dt^2$$

$$T_{a_z} = J_z \cdot d^2w_z/dt^2$$

Tanto x , y e z quanto dw_x , dw_y e dw_z são controladas via GPS na base de controle.

19.1.5. Calibração e Sustentação

Sistemas de medição de altitude podem ser baseados em altímetros eletrônicos que medem a pressão atmosférica e conseqüentemente calculam sua altitude. No entanto, tais modelos precisam ser calibrados antes e depois de cada missão, pois variações de temperatura na atmosfera alteram a pressão da mesma alterando-se assim o valor do altímetro medido. Assim a calibração de pressão atmosférica é uma atividade que deve ser regulada o tempo todo para garantir que veículos estejam medindo em tempo real a altitude verdadeira.

As forças de voo vertical são baseadas na velocidade angular da asa ao quadrado e são proporcionais ao coeficiente de sustentação c_l . Todo voo vertical necessita ser monitorado em relação a sua altitude. A derivada da altitude define a velocidade do voo em subida e a derivada da velocidade define a aceleração de subida que ao multiplicar-se pela sua massa, pode-se calcular a

força de subida.

Estes cálculos não são realizados nas aeronaves MAV, mas sim na base de controle. Como a variação de altitude e de temperatura gera uma variação na calibração dos sensores eletrônicos de altitude, sempre que a MAV realize um pouso, os operadores de solo devem realizar uma aferição da correta medição de altitude, garantindo um correto processo de medição e de validação no próximo voo.

A calibração também deve ser realizada nos sensores de pitot das direções x, y e z e nas rotações wx, wy e wz. Caso a calibração não seja aferida durante todos os pousos, dificilmente a operação do GPS na base estará executado a contento.

Ou seja, a única forma de garantir que o GPS da base opere de forma correta e continuamente é realizar, após todo o pouso, que a calibração de voo horizontal nas direções x, y e z; e também a calibração de sustentação vertical seja sempre atualizada e quando falha, deve ser corrigida.

A correta calibração de voo horizontal e de voo vertical é a única garantia que se tem para que as posições, as velocidades, as acelerações e as forças e torques sejam medidos e calculados de maneira a manter sua qualidade de voo assegurada.

Quando se pretende localizar drogas, tóxicos, bombas, armas e outros objetos de alto risco é fundamental que a informação correta da geografia e da localização da posição destes objetos de alto risco, seja operacionalizado de maneira que a equipe humana de solo possa executar sua atividade de ação e correção para apreender estes equipamentos, drogas, tóxicos, bombas, armas e outros.

Ou seja, um MAV não calibrado para localização de sua localização e geografia gera informações equivocadas e não permite que a equipe humana de solo realize uma ação corretiva

certeira.

Como as aeronaves MAV operam de forma conjunta e coletiva, devido à baixa capacidade de carga, cada MAV carrega um sensor específico. Um primeiro carrega sensores de drogas, um segundo MAV carrega sensores de tóxicos, um terceiro sensores de bombas, um quarto sensores de armas e todos trabalham de forma contínua e sincronizada de forma que o voo coletivo se torne um voo eficaz; todos fornecem informações coletivas para a base e, esta define a estratégia de cada MAV operador para os próximos passos próximas dinâmicas de movimento que pode ser continuar a operação ou recuar para a base.

Não se pode imaginar uma operação de voo das MAV sem que se execute a operação de manutenção e calibração mandatória de cada aeronave. A calibração pode ser feita rapidamente pela equipe em solo uma vez que esta é bem simples, bastando para tanto trocar um pitot falho por um pitot corrigido e sem falha; Do mesmo jeito que pode-se trocar o pitot, pode-se também trocar o sensor eletrônico de altitude (altímetro) e esta passa a garantir a qualidade de voo das aeronaves.

19.1.6. Medições Inerciais

Veículos MAV precisam medir e/ou calcular em tempo real, o tempo todo, as características de inércia, tais como variáveis com posições x , y e z ; variáveis de velocidades dx/dt , dy/dt , dz/dt ; variáveis de aceleração d^2x/dt^2 , d^2y/dt^2 , d^2z/dt^2 ; ângulos de posicionamento espacial α (ataque), β (rolamento) e γ (guinada); Estas variáveis podem ser medidas e/ou calculadas através do uso apropriado de sistemas GPS e controles de altitude.

Da mesma maneira que se mede as posições x , y e z ; deve-se também medir as rotações w_x , w_y e w_z e calcular as acelerações de rotação dw_x/dt , dw_y/dt e dw_z/dt e seu instantâneo medidor de ângulo de ataque, de rolamento e de guinada;

Em uma aeronave de asa fixa ou em uma aeronave de asa rotativa o controle destas variáveis precisa ser operado durante todo o tempo, sem parar; e é fundamental para garantir a

segurança dos tripulantes, dos passageiros e das cargas.

Estas variáveis são medições inerciais e são controladas o tempo todo; se ficarmos sem uma delas, perderemos o correto controle de posição e de direção das aeronaves. É interessante ter um sensor back-up caso alguma das variáveis se tornem falhas, ineficiente ou ineficazes.

Mais uma vez, as medições inerciais não são guardadas nem calculadas nas aeronaves MAV, mas sim na base, isto posto que na base há uma maior quantidade de memória e processadores mais flexíveis e complexos. Os processadores nas MAV são de operação como se fossem máquinas de estado com dedicação exclusiva de medir informações, enviar para a base, receber da base e executar missões planejadas e calculadas pela base.

Sem as medições inerciais corretas a base não tem condições de planejar a estratégia de voo, gerar os movimentos desejados, enviar o plano de voo para as aeronaves MAV e realizar continuamente durante todo o tempo a leitura das variáveis, o replanejamento e o recálculo das variáveis de voo e o envio para as aeronaves o novo voo planejado.

O que significa que sem as variáveis de medições inerciais, a base não tem condição de executar um planejamento de voo adequado, para todas as aeronaves que voam simultaneamente.

Portanto, voar com as corretas variáveis inerciais medidas, representa uma total condição de voo correto das aeronaves, e isto não se limita a aeronaves MAV, mas sim para todas as aeronaves de asa fixa e de asa rotativa.

Voar com as informações corretas significa voar com segurança, seja qual for o tipo de voo que se realize.

20.1.1) Segue o Glossário de Variáveis para Modelo de Voo da abelha em 8 fases:

“Dinâmica de Voo de Sistema Biológico: a Abelha”

MAV = Veículo Micro Aéreo

$$dI = F \cdot dt = m \cdot dv$$

onde dI = diferencial de impulse

F = força atuante no instante t

dt = diferencial de tempo

m = massa do Sistema

dv = diferencial de velocidade

L = força de sustentação

D = força de arrasto

S_x = área projetada no plano xy

S_y = área projetada no plano yz

T = força de tração vertical

H = força de tração horizontal

ϕ = ângulo de ataque

γ = ângulo de direção de velocidade

T = período do ciclo

Teta 1 = ângulo de articulação da asa

Teta 2 = ângulo de articulação da anti-asa

Teta 3 = ângulo de articulação da ponta-de-asa

c_l = coeficiente de sustentação

c_d = coeficiente de arrasto

$c(r)$ = corda em função do raio r

dr = diferencial de raio

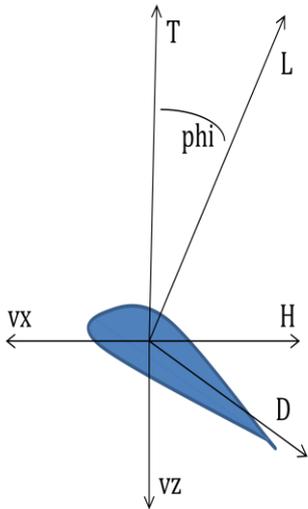
Emp = empuxo

Emp_x = empuxo na direção x

Emp_z = empuxo na direção z

Segue o Modelo de Voo da abelha, dividido em 8 fases:

T/8:



$$L = 1/2 \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot S_x \cdot c_l$$

$$D = 1/2 \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot S_x \cdot c_d$$

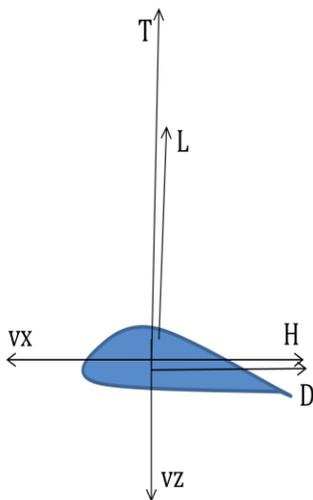
$$dS_x = c(r) \cdot \cos(\phi) \cdot dr$$

$$dS_y = c(r) \cdot \sin(\phi) \cdot dr$$

$$T = L \cdot \cos(\phi) - D \cdot \sin(\phi) + 1/2 \cdot \rho \cdot V_z^2 \cdot S_x$$

$$H = L \cdot \sin(\phi) + D \cdot \cos(\phi) + 1/2 \cdot \rho \cdot V_z^2 \cdot S_y$$

T/4:



$$L =$$

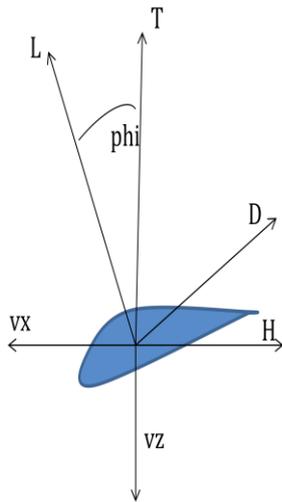
$$D =$$

$$dS =$$

$$T =$$

$$H =$$

3T/8:



$$L = 1/2 \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot S_x \cdot c_l$$

$$D = 1/2 \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot S_x \cdot c_d$$

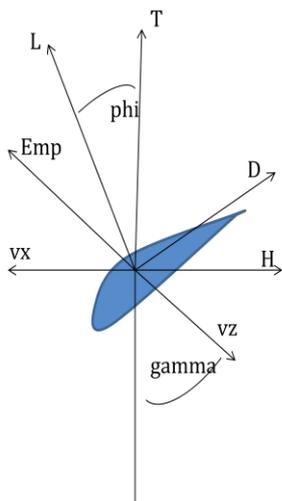
$$dS_x = c(r) \cdot \cos(\phi) \cdot dr$$

$$dS_y = c(r) \cdot \sin(\phi) \cdot dr$$

$$T = L \cdot \cos(\phi) + D \cdot \sin(\phi) + 1/2 \cdot \rho \cdot V_z^2 \cdot S_x$$

$$H = -L \cdot \sin(\phi) + D \cdot \cos(\phi) + 1/2 \cdot \rho \cdot V_z^2 \cdot S_y$$

T/2:



$$L = 1/2 \cdot \rho \cdot (V_x - V_z \cdot \sin(\gamma))^2 \cdot S_x \cdot c_l$$

$$D = 1/2 \cdot \rho \cdot (V_x - V_z \cdot \sin(\gamma))^2 \cdot S_x \cdot c_d$$

$$dS_x = c(r) \cdot \cos(\phi) \cdot dr$$

$$dS_y = c(r) \cdot \sin(\phi) \cdot dr$$

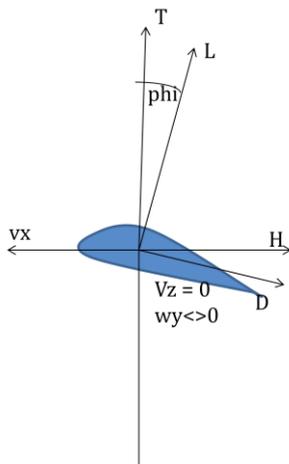
$$T = L \cdot \cos(\phi) + D \cdot \sin(\phi) + 1/2 \cdot \rho \cdot (V_z \cdot (\cos(\gamma))^2) \cdot S_x + \text{Emp}_z$$

$$H = -L \cdot \sin(\phi) + D \cdot \cos(\phi) + 1/2 \cdot \rho \cdot (V_z \cdot (\sin(\gamma))^2) \cdot S_y - \text{Emp}_x$$

$$\text{Emp}_x = 1/2 \cdot \rho \cdot (V_z \cdot (\sin(\gamma))^2) \cdot S_y$$

$$\text{Emp}_z = 1/2 \cdot \rho \cdot (V_z \cdot (\cos(\gamma))^2) \cdot S_x$$

5T/8:



$$L = 1/2 \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot S_x \cdot c_l$$

$$D = 1/2 \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot S_x \cdot c_d$$

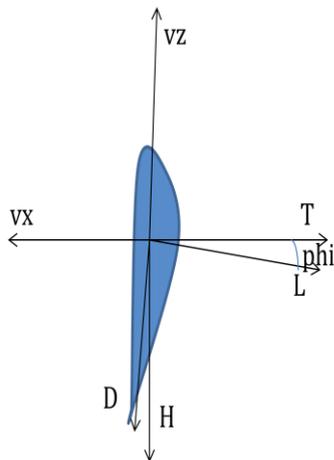
$$dS_x = c(r) \cdot \cos(\phi) \cdot dr$$

$$dS_y = c(r) \cdot \sin(\phi) \cdot dr$$

$$T = L \cdot \cos(\phi) - D \cdot \sin(\phi)$$

$$H = L \cdot \sin(\phi) + D \cdot \cos(\phi)$$

3T/4:



$$L = 1/2 \cdot \rho \cdot V_z^2 \cdot S_x \cdot c_l$$

$$D = 1/2 \cdot \rho \cdot V_z^2 \cdot S_x \cdot c_d$$

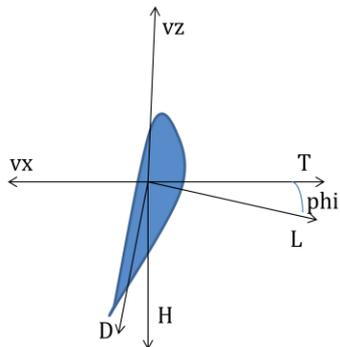
$$dS_x = c(r) \cdot \cos(\phi) \cdot dr$$

$$dS_y = c(r) \cdot \sin(\phi) \cdot dr$$

$$T = L \cdot \cos(\phi) - D \cdot \sin(\phi)$$

$$H = L \cdot \sin(\phi) + D \cdot \cos(\phi)$$

7T/8:



$$L = 1/2 * \rho * V_z^2 * S_x * c_l$$

$$D = 1/2 * \rho * V_z^2 * S_x * c_d$$

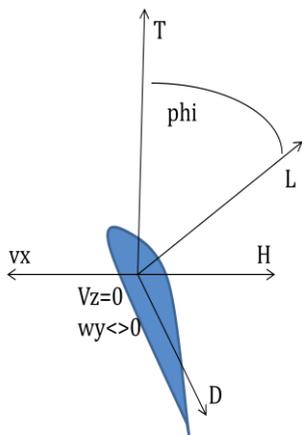
$$dS_x = c(r) * \cos(\phi) * dr$$

$$dS_y = c(r) * \sin(\phi) * dr$$

$$T = L * \cos(\phi) - D * \sin(\phi)$$

$$H = L * \sin(\phi) + D * \cos(\phi)$$

T:



$$L = 1/2 * \rho * V_x^2 * S_x * c_l$$

$$D = 1/2 * \rho * V_x^2 * S_x * c_d$$

$$dS_x = c(r) * \cos(\phi) * dr$$

$$dS_y = c(r) * \sin(\phi) * dr$$

$$T = L * \cos(\phi) - D * \sin(\phi) + 1/2 * \rho * V_x^2 * S_x$$

$$H = L * \sin(\phi) + D * \cos(\phi) + 1/2 * \rho * V_x^2 * S_y$$

6. CONCLUSÕES

As consequências deste trabalho orientam o desenvolvimento de novas capacidades de voo, gerando uma melhoria em relação às capacidades de manobra e às flexibilidades de voo para novas aeronaves a serem construídas no futuro, principalmente para aeronave MAV (Micro Air Vehicles).

As aeronaves MAV que venham a ser construídas imitando a dinâmica de voo das abelhas, faz com que se potencialize não somente o estudo de dinâmica de voo destes insetos, mas também sugere que sejam concebidos uma nova cadeira de engenharia, chamada Engenharia da Natureza.

Esta hipotética cadeira de Engenharia da Natureza viria a desenvolver máquinas e equipamentos que imitem o comportamento biológico, fisiológico, anatômico, hídrico, aéreo e mecânico; sugere também que se estude outras funções exercidas por todos e quaisquer seres vivos da flora e da fauna.

A sugestão de construção de uma cadeira de Engenharia da Natureza faz com que se proponha a concepção de equipes de profissionais pesquisadores multidisciplinares de forma a unir biólogos, fisiologistas, anatomistas, físicos, químicos, engenheiros mecânicos, eletrônicos, aeronáuticos, navais, entre outros; todos atuando conjuntamente.

Esta tese propõem um conjunto de modelagem matemática que passa por todo o modelo de voo das abelhas e também capacita pesquisadores a implementar estas técnicas e modelos matemáticos em aeronaves MAV que imitem a performance de voo das abelhas.

REFERÊNCIAS

**[1] NASA, BIOLOGICAL AND AERODYNAMIC PROBLEMS
WITH THE FLIGHT OF ANIMALS**

**[2] NASA, ENGINEERING DERIVATIVES FROM BIOLOGICAL SYSTEMS
FOR ADVANCED AEROSPACE APPLICATIONS**

**[3] NASA, ENGINEERING DERIVATIVES FROM BIOLOGICAL SYSTEMS
FOR ADVANCED AEROSPACE APPLICATIONS**

[4] NASA, THE CASE FOR FLAPPING FLIGHT

[5] NASA, BIOMIMETICS FOR CENTER NASA LANGLEY RESEARCH

[6] NASA, AVST MORPHING PROJECT RESEARCH

[7] NASA, BIOLOGICALLY INSPIRED MICRO-FLIGHT RESEARCH

**[8] NASA, MECHANIZATION AND CONTROL CONCEPTS FOR
BIOLOGICALLY INSPIRED MICRO AERIAL VEHICLES**

**[9] NASA, FLIGHT TESTING OF NOVEL COMPLIANT SPINES FOR
PASSIVE WING MORPHING ON ORNITHOPTERS**

[10] MIT, UNTETHEREDHOVERING FLAPPING FLIGHT TO 3D-PRINTED MECHANICAL INSECT

[11] MIT, A COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF BIO-INSPIRED FORMATION FLIGHT AND GROUND EFFECT

[12] MIT, A COMPUTATIONAL FRAMEWORK FOR FLUID STRUCTURE INTERACTION IN BIOLOGICALLY INSPIRED FLAPPING FLIGHT

[13] MIT, THE NUMERICAL SIMULATION OF FLAPPING WINGS AT LOW REYNOLDS NUMBERS

[14] MIT, BIOLOGICALLY INSPIRED MECHANISMS FOR BURROWING IN UNDERSEA SUBSTRATES

[15] MIT, SIMULATIONS OF A PASSIVELY ACTUATED OSCILLATING AIRFOIL USING A DISCONTINUOUS GALERKIN METHOD

[16] MIT, DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN AUTONOMOUS ORNITHOPTER

[17] MIT, A NUMERICAL EXPLORATION OF PARAMETER DEPENDENCE IN POWER OPTIMAL FLAPPING FLIGHT

[18] MIT, REVIEW OF EXPERIMENTAL WORK IN BIOMIMETIC FOILS

[19] MIT, EXPERIMENTAL STUDIES OF FLAPPING FOILS FOR ENERGY EXTRACTION

[20] MIT, HOW DO BATS FLY? UNDERSTANDING FLAPPING FLIGHT