

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE MATEMÁTICA**  
**INSTITUTO TERCIO PACITTI**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

**MURILO OLIVEIRA MACHADO**

**PREDIÇÃO DE AJUSTES EM VÔOS DE AVES MIGRATÓRIAS  
SAZONAIS NOTURNAS: um simulador com adequação nebulosa**

Rio de Janeiro  
2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE MATEMÁTICA**  
**INSTITUTO TERCIO PACITTI**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

**MURILO OLIVEIRA MACHADO**

**PREDIÇÃO DE AJUSTES EM VÔOS DE AVES MIGRATÓRIAS  
SAZONAIS NOTURNAS: um simulador com adequação nebulosa**

Dissertação de Mestrado submetida ao Corpo Docente do Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Matemática, e Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Informática.

Orientador: Josefino Cabral de Melo Lima

Rio de Janeiro  
2012

O48 Oliveira Machado, Murilo

Predição de ajustes em vôos de aves migratórias sazonais noturnas:  
um simulador com adequação nebulosa / Murilo Oliveira Machado -- Rio  
de Janeiro: UFRJ /IM/ NCE2012.

106 f.: il.

Orientador: Josefino Cabral de Melo Lima.

Dissertação (Mestrado em Informática) Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, Instituto de Matemática, Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e  
Pesquisas Computacionais, Programa de Pós-Graduação em Informática, 2012.

1. Simulação. 2. Simulador com Adequação Nebulosa. 3. Vôos de Aves  
Migratórias. – Teses. I. Lima, Josefino Cabral de Melo (Orient.). II.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro Instituto de Matemática, Instituto  
Tércio Pacitti de Aplicações e Pesquisas Computacionais, Programa de Pós-  
Pós-Graduação em Informática. III. Título.

CDD

MURILO OLIVEIRA MACHADO

**PREDIÇÃO DE AJUSTES EM VÔOS DE AVES MIGRATÓRIAS  
SAZONAIS NOTURNAS: um simulador com adequação nebulosa**

Dissertação de Mestrado submetida ao Corpo Docente do Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Matemática, e Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Informática.

Aprovada em: 24/02/2012

*A moça mais linda que me deu colo durante este trabalho.*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu pai que sempre fez tudo o que pôde para eu chegar onde estou e a minha mãe que sempre esteve comigo em todos esses lugares que tenho percorrido. Aos meus irmãos que, cada um com seu jeito (nem sempre ortodoxo), possibilitaram a realização de mais um sonho.

Ao meu amigo de infância Pedro FILHO, que foi a primeira pessoa a financiar de fato este projeto. Ao amigo Wellington PRATA que demonstrou seu valor de ouro. Aos amigos do alojamento da UFRJ que contribuíram significativamente para minha inserção no Rio de JANEIRO.

Em particular, gostaria de agradecer à Juliana REZENDE pela ajuda crucial, em revisar meu texto, na reta final dessa dissertação. Ao Miranda que com muita calma e gentileza resolveu meus problemas com a estatística.

Aos professores do PPGI-UFRJ, que em suas aulas ofereceram-me conhecimento e me suportaram, com muita paciência, em dúvidas nem sempre muito coerentes. Em especial ao prof. Marcos ELIAS o qual abriu meus olhos para o formalismo de Lagrange, ao Prof. THOMÉ por ter disponibilizado minha bolsa CAPES.

Ao meu orientador, Cabral LIMA, que mesmo antes de conhecer minhas idéias contribuiu de forma decisiva para a conclusão dessa dissertação, com sua orientação criteriosa, exigente, por vezes bastante rígida, mas que soube imprimir, com maestria, qualidade ao meu trabalho.

Ao professor Carlos Alberto FRANCO, meu primeiro orientador e meu amigo, por ter

acreditado em minhas idéias de pesquisa e ter sido sempre um suporte em minhas batalhas.

Ao professor Adriano CRUZ pelos ensinamentos e pela forma sempre compreensiva com a qual me tratou nesses anos de mestrado.

Gostaria também de agradecer ao eminente professor Carlos Alberto DIAS por ter encontrado um espaço em sua assaz disputada agenda e vir contribuir na avaliação dessa dissertação.

## RESUMO

MACHADO, Murilo Oliveira, **Predição de ajustes de vôos de aves migratórias sazonais noturnas: um simulador com adequação nebulosa**. 2012. 106 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Instituto de Matemática, Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e Pesquisas Computacionais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Esta dissertação propõe um simulador com adequação nebulosa para prever os ajustes de direção e velocidade que devem ser efetuados por uma ave com hábito noturno quando de sua migração sazonal, em função dos ventos laterais. O foco mais geral desse simulador é mostrar que um modelo nebuloso pode ser eficiente na representação de estratégias escolhidas por uma ave em migração. Esse modelo nebuloso usado pelo simulador inspira-se em um modelo matemático clássico para ajustes de direção e velocidade em função da direção do vento e de custos energéticos. Esta dissertação propõe uma lagrangeana para a simulação de um vôo migratório, considerando dois parâmetros principais: um objetivo fixo e a influência de ventos laterais ao vôo. Uma regressão linear aplicada entre as medidas obtidas com o simulador e medidas obtidas através de experimentos reais com uma ave migratória sazonal noturna (*Apus apus*) mostrou a adequabilidade da aplicação do simulador proposto. Os resultados obtidos corroboram para demonstrar a eficácia de modelos nebulosos para simular comportamentos compensatórios à deriva do vento na migração de uma ave sazonal noturna.

Palavras-chave: sistemas bio-inspirados, modelo nebuloso, compensação à deriva do vento, predição de vôos migratórios.

# ABSTRACT

MACHADO, Murilo Oliveira, **Predição de ajustes de vôos de aves migratórias sazonais noturnas: um simulador com adequação nebulosa**. 2012. 106 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Instituto de Matemática, Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e Pesquisas Computacionais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

This work proposes a simulator with fuzzy suitability to predict the direction and speed adjustments to be made by a bird due to side-winds effects, with nocturnal habits during their seasonal migration. The general focus of this simulation is to show that a fuzzy model can be effective for the representation of strategies chosen by a bird in migration. The fuzzy model used by the simulator is based on a classical mathematical model for adjustments in direction and velocity as a function of wind direction and energy costs. This work proposes a Lagrangian for the simulation of a migratory flight, considering two main parameters: a fixed goal and the influence of wind-side in a flight. A linear regression applied between the measurements obtained with the simulator and measurements obtained from actual experiments with a seasonal nocturnal migratory bird (*Apus apus*) showed the suitability of application of the proposed simulator. The obtained results demonstrate the effectiveness of fuzzy models to simulate compensatory behaviors due to wind drift in a nocturnal bird migration.

Keywords: bio-inspired systems, fuzzy model, the wind drift compensation, prediction of migratory flights.

## FIGURAS

Figura 2.1 Conjuntos nebulosos para “Estatura Média” [CRUZ 2004].....	21
Figura 2.2 Função linear crescente [CRUZ 2004]. .....	22
Figura 2.3 Função triangular [CRUZ 2004].....	22
Figura 2.4 Sigmóide crescente. [CRUZ 2004].....	22
Figura 3.1 – V-like .....	43
Figura 3.2 - Regiões upwash ( $U - j$ e $U + j$ ) e downwash ( $D_j$ ). [NATAN e BARBOSA, 2007]. .....	45
Figura 4.1 - Potência requerida no vôo da ave <i>Apus apus</i> .....	47
Figura 4.2 – Modelo da velocidade vetorial da ave com o vetor vento [ALERSTAM 1979]. .....	49
Figura 4.3 – Modelo geométrico representando a influência do vento [LIECTHI, 1995]. .....	50
Figura 4.4 - Coordenadas generalizadas $d'$ e $X$ vinculadas ao objetivo fixo e à força do vento lateral.....	54
Figura 4.5 - Potencial dependente da velocidade quadrática, $k = 0.5$ .....	55
Figura 4.6- Nebulização da entrada. (esquema do modelo nebuloso). .....	57
Figura 4.7 – Conjuntos nebulosos para a direção coplanar do vento em relação ao corpo da ave. ....	58
Figura 4.8 – Conjuntos nebulosos para as saídas: (a) velocidade da ave; (b) ângulo de compensação da deriva. ....	59
Figura 4.9 – Modelo de compensação da deriva do vento ao longo de um eixo migratório. ....	60
Figura 5.1– Dependência da velocidade (a) e direção (b) em função da direção coplanar do vento.....	69
Figura 5.2 – Dependência da velocidade e direção em função da direção coplanar do vento.....	71
Figura 5.3– Dependência da velocidade e direção em função da direção coplanar do vento .....	72
Figura 5.4 – Simulações para a direção (ângulo de compensação (a) e velocidade (b)) da ave em função da direção do vento. ....	73
Figura 5.5 Regressão linear entre as medidas simuladas e as medidas encontradas na natureza para (a) direção da ave no ar e (b) para o rastreamento em relação ao solo.....	82

## TABELAS

Tabela 5.1- Correlação entre as médias Wind e Track e os cálculos Heading, para amostra contendo todos os ventos de outono. ....	74
Tabela 5.2- Correlação entre as médias Wind e Track e os cálculos de Heading para as amostras contendo os ventos pertencentes à classe Oeste de outono. ....	75
Tabela 5.3- Correlação entre as médias Wind e Track e os cálculos Heading para amostras contendo os ventos pertencentes à classe Leste de outono. ....	76
Tabela 5.4- Regressão linear entre as médias Wind e Track para amostra contendo todos os ventos de outono. ....	77
Tabela 5.5- Regressão Linear entre as médias Wind e Track para amostra pertencente à classe dos ventos Oeste para o outono. ....	78
Tabela 5.6- Regressão linear entre as médias Wind e Track para amostra pertencente à classe dos ventos Leste para o outono. ....	78
Tabela 5.7- Regressão linear entre as médias Wind, Track e Heading para amostra contendo todos os ventos de outono. ....	79
Tabela 5.8- Regressão linear entre as médias Wind , Track e Heading para amostra pertencente à classe dos ventos Oeste para o outono. ....	80
Tabela 5.9- Regressão linear entre as médias Wind , Track e Heading para amostra pertencente à classe dos ventos Leste para o outono. ....	80
Tabela 5.10 - Valores encontrados pela regressão linear. ....	82
Tabela 5.11 - Medidas obtidas com a simulação do modelo nebuloso. ....	83

# SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO .....	15
2 - TEORIAS, TÉCNICAS E METODOLOGIAS DE SUPORTE AO SIMULADOR COM ADEQUAÇÃO NEBULOSA .....	18
2.1 Lógica Nebulosa .....	18
2.1.1 Princípio da incompatibilidade .....	19
2.1.2 Conjuntos Nebulosos .....	20
2.1.2.1 Função de inclusão.....	21
2.2 Abordagem Lagrangeana .....	23
2.2.1 Princípio de d'ALAMBERT .....	24
2.2.2 Princípio dos trabalhos virtuais.....	25
2.2.3 Coordenadas generalizadas .....	25
2.2.4 Potencial dependente das velocidades .....	26
2.2.5 Trabalho virtual .....	26
2.2.6 Equações de LAGRANGE.....	27
2.3 Sistemas bio-inspirados.....	30
2.3.1 Sistema biologicamente realista.....	31
2.3.2 Inteligência de enxame.....	31
3- VÔOS DE AVES SAZONAIS MIGRATÓRIAS: CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES .....	34
3.1 Vôos migratórios.....	34
3.1.2 Histórico.....	34
3.1.3 Variáveis significativas para a migração .....	35
3.1.4 A Compensação da deriva .....	36
3.1.5 Compensação da influência do vento lateral em função da distância ao objetivo...	37
3.1.6 Rastreamento da Ave <i>Apus apus</i> .....	37
3.2 Simuladores para aves artificiais.....	38
3.2.1 Histórico.....	38
3.2.2 Consumo energético de uma ave em migração.....	39

3.2.3 Aplicação em radares .....	39
3.2.4 Simuladores para um bando de aves artificiais .....	40
4 – PREDIÇÃO DE AJUSTE EM VÔOS PARA AVES MIGRATÓRIAS SAZONAIS NOTURNAS .....	44
4.1 Força de NEWTON .....	44
4.1.1 Consumo de energia requerida pela ave.....	44
4.1.2 Compensação da deriva do vento com objetivo fixo e distância restante.....	46
4.1.3 Estratégia para minimizar o gasto de energia em função do vento lateral e de um objetivo fixo .....	47
4.2 Proposta de uma Lagrangeana para um vôo com vento lateral e objetivo fixo .....	51
4.3 Simulador e adequação nebulosa .....	53
4.3.1 Nebulização.....	54
4.3.2 Inferência de regras .....	55
4.3.3 Desnebulização .....	55
5 – SIMULAÇÕES E EXPERIMENTAÇÕES.....	57
5-1 Comparação entre os modelos .....	57
5.1.1 A Equação de LIECHTI .....	58
5.1.2 A Equação de LAGRANGE.....	58
5.1.3 O Modelo nebuloso .....	59
5.2 Simulações da compensação da deriva .....	59
5.2.1 Parâmetro de compensação .....	60
5.3 Amostras empíricas para compensação da deriva do vento lateral .....	61
5.3.1 Correlação circular .....	61
5.3.2 Correlação linear e previsão.....	62
5.4 Resultados .....	63
5.4.1 Implementação da equação de LIECHTI.....	63
5.4.2 Implementação da equação de LAGRANGE .....	65
5.4.3 Implementação do modelo Nebuloso.....	66
5.4.5 Testes estatísticos .....	68
5.4.6 Modelos de previsão estatística.....	71
5.4.6.1 Variável dependente $T$ e variável independente $W - T(W)$ .....	71
5.4.6.2 Variável dependente $He$ e variáveis independentes $W$ e $T - H(W, T)$ .....	72
5.4.7 Análise da regressão linear: medidas simuladas x medidas observadas. ....	74
6 – CONCLUSÕES .....	77

6.1 Algumas comparações entre os modelos .....	77
6.2 Validação estatística das amostras.....	78
6.2.1 Análise da correlação estatística para os dados utilizados .....	79
6.3 Simulações dos modelos .....	83
7- DIFICULDADES ENCONTRADAS E TRABALHOS FUTUROS .....	85
7.1 Motivações .....	85
7.2 Trajetória percorrida.....	86
7.4 Contribuições .....	88
7.5 Trabalhos futuros.....	89
REFERÊNCIAS.....	90

# 1 - INTRODUÇÃO

A integração de diversas áreas de conhecimento vem se mostrando um desafio interessante de pesquisa. A ciência da computação tem se mostrado como um amálgama de ligação entre todas as camadas da construção desse desafio. Modelos computacionais vêm sendo desenvolvidos e aplicados no intuito de formalizar e concretizar alguns problemas de natureza teórica e prática. Em particular, a inteligência computacional tem oferecido, através de ferramentas tais como as redes neurais, a lógica nebulosa, os algoritmos genéticos etc., alguns modelos que vêm sendo aplicados com êxito em soluções de problemas do cotidiano. A integração de escopos computacionais inteligentes aos de sistemas bio-inspirados, por exemplo, tem sido objeto de interessantes pesquisas recentemente publicadas em revistas reconhecidas da área tais como *Emergent Systems*, *Artificial Life*, e *Behavior Based Robotics*. A idéia de base é que existe uma inteligência no comportamento global de um grupo de agentes, ainda que cada agente siga regra simples e não conheça nenhum controle central guiando seu comportamento [BENI and WANG 1988, BONABEAU 1999, NICLOUD 2009]. Os exemplos mais clássicos são os relacionados à *ant colonies* [ANKIT 2011, CHEN 2011], *fish schooling* [ZHANG 2010, CAPELLO 2011] e *bird flocking* [REYNOLDS 1987, BAJEC 2005, NATAN e BARBOSA 2007].

Nessa dissertação nós mostramos um novo simulador computacional baseado no modelo sobre migração de aves proposto por Thomas ALERSTAM e Felix LIECHTI [ALERSTAM 1979, LIECHTI 1995]. O modelo nebuloso utilizado por esse simulador nos indicou que modelos baseados na teoria nebulosa podem ser considerados adequados e robustos para a modelagem de estratégias de grupos de aves em migração sazonal, notadamente no que concerne a ação efetuada por cada ave como compensação da deriva

do vento, dados o objetivo final e a distância que falta para a ave atingi-los. Aplicações do modelo proposto no simulador resultaram em dados promissores quando foram comparados a dados empiricamente observados [HENNINGSSON 2009, KARLSSON, 2010].

A aplicação de modelos nebulosos parece efetivamente ser a mais natural para modelar o comportamento de aves migratórias dado que geralmente a estratégia adotada pelas aves em suas jornadas migratórias dificilmente pode ser determinada com exatidão por causa de suas propriedades mais qualitativas do que quantitativas [GREEN 2002]. Algumas pesquisas importantes [BAJEC 2003, 2005] usam a teoria nebulosa na predição de possibilidades de estratégias utilizadas por uma ave em migração, visando o controle de radares para o controle do tráfego aéreo. Outra defesa em prol do uso de modelos nebulosos advém do fato de que algumas medidas empíricas que foram obtidas com a ave *Apus apus* [HENNINGSSON 2009, KARLSSON 2010] não condiziam exatamente com previsões encontradas anteriormente, notadamente no que concerne a compensação dada pela ave para corrigir a deriva do vento [ALERSTAM 1979, LIECHTI 1995]. É bastante conhecida a rigidez detectada nessas últimas décadas por alguns modelos propostos [AXELL 1963, WILCOCK 1964, EVANS 1966] em analisar uma grande quantidade de dados, geralmente imprecisos e nem sempre compatíveis com o esperado, relacionados à deriva do vento e à compensação completa efetuada pela ave [GREEN 2002].

O simulador proposto nessa dissertação baseia-se em um estudo detalhado que fizemos do trabalho de LIECHTI e ALERSTAM [ALERSTAM 1979, LIECHTI 1995], como também de outros modelos propostos na literatura [PENNYCUICK 2008, HEDENSTRÖM 2002]. Uma contribuição particular, e que difere dos modelos estudados, consiste na elaboração de um modelo nebuloso e de uma lagrangeana usados num simulador que conseguiu, com sucesso, predizer a compensação da deriva de ventos laterais de uma ave migratória sazonal noturna. Os resultados obtidos nas simulações com o modelo proposto foram comparados com o modelo de LIECHTI [LIECHTI 1994, 1995] e se mostraram bastante satisfatórios. Propusemos para o modelo do simulador que

a equação de movimento fosse representada por uma lagrangeana cujos vínculos holônomos<sup>1</sup> foram obtidos via o triângulo de velocidades proposto por LIECHTI e ALERSTAM, ainda que o atrito com o ar seja, em nosso modelo, representado através do potencial generalizado, também conhecido como “potencial dissipativo”, proposto por Rayleigh [LEMOS 2000], é utilizado como uma função de consumo energético [PENNYCUICK 2008].

O primeiro capítulo dessa dissertação introduziu o problema que foi objeto central da pesquisa e relacionou esse problema a alguns estudos anteriores, bem como prenunciou quais as contribuições principais do simulador nebuloso proposto. O segundo capítulo descreverá os aspectos teóricos e tecnológicos que serviram de suporte ao modelo proposto, bem como mostrará um estado da arte relativo ao problema abordado. O terceiro capítulo está relacionado diretamente à “parte biológica” dessa dissertação que trata de um sistema bio-inspirado, mostrando os estudos biológicos e as características principais de vôos de aves, particularmente no que concernem as aves migratórias sazonais noturnas. O quarto capítulo descreve o simulador e modelo nebuloso proposto assinalando as leis biológicas e físicas, bem como os estudos anteriores relacionados, que serviram como alicerce à nossa proposta. O quinto capítulo descreve as simulações e os resultados delas obtidos, descrevendo as metodologias de comparação com dados advindos empiricamente. O sexto capítulo apresenta uma conclusão da dissertação e o sétimo e último capítulo mostra as dificuldades encontradas e propõe alguns trabalhos futuros.

---

1 *Do grego hólós (inteiro, completo) e nómos (regra, lei). Vínculos integráveis (LEMOS, 2000).*

## 2 - TEORIAS, TÉCNICAS E METODOLOGIAS DE SUPORTE AO SIMULADOR COM ADEQUAÇÃO NEBULOSA

### 2.1 Lógica Nebulosa

Decorrente da junção de alguns teoremas matemáticos surgidos no final do século XIX e que “violaram” os limites da lei da não contradição aristotélica, a lógica nebulosa pode ser definida como uma lógica “possibilística”, aproximada e ambígua, proposta por ZADEH [ZADEH 1965] que cunhou o termo “nebuloso” no sentido de “vago”. Na década de 20 Bertrand Russel propôs o relaxamento da lei da não contradição, para que afirmações indefinidas pudessem ser operadas [RUSSEL 1923]. Desde então, matemáticos tais como LUKASIEWICZ, KAPLAN, SCHOTT, entre outros, têm desenvolvido uma ramificação da teoria dos conjuntos que foi consolidada em 1965 com os trabalhos de ZADEH que demonstravam que os conjuntos nebulosos são capazes de operar as afirmações indefinidas. Em 1973 ZADEH introduziu o princípio da incompatibilidade. Segundo [BARROS and BASSANEZI 2006], a teoria dos conjuntos nebulosos é uma metodologia heurística que, cada vez mais, vem sendo usada como ferramenta para formulação de modelos matemáticos.

A aceitação da *Teoria Nebulosa* pelo mundo ocidental teve um atraso devido a diversos fatores, pois a ciência estava fortemente enraizada à lógica aristotélica e às belas leis físicas enunciadas como verdades absolutas. Numa época em que alguns conceitos probabilísticos estavam começando a serem aceitos como substitutos de conceitos determinísticos, foi então apresentado nos EUA um trabalho contendo uma teoria

possibilística que, devido a sua eficiência em algumas aplicações consideradas arrojadas (tal como controlar o metrô da cidade japonesa de Sendai em 1987), vem abrindo novos horizontes na utilização de seus conceitos em diversas aplicações do mundo real. Logo em seguida (1988) o governo japonês implantou uma política de apoio às pesquisas abordando o tema *Lógica Nebulosa*.

Recentemente a lógica nebulosa tem sido utilizada em contextos diversos, desde avaliar um aluno nas mais diferenciadas atividades, até escolher o lugar mais adequado para estocar uma cerveja em um supermercado ou gerenciar o aquecimento de um forno de micro-ondas. Trabalhos mais arrojados têm surgido na área de Ciências Exatas e da Terra, tal como o uso de sistemas nebulosos no ramo da nanotecnologia, capazes de simular possíveis estruturas de nanomaterias. Ainda não existem muitos trabalhos em física pura, contudo a integração desta teoria à área da ciência tem se mostrado promissor [NELI 2001]. Ainda a se notar que a computação quântica tem realizado algumas associações entre a ciência da computação, a física e a teoria nebulosa.

### **2.1.1 Princípio da incompatibilidade**

À medida que a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade para fazer afirmações precisas e que sejam significativas acerca deste sistema diminui, até que um limiar seja atingido, além do qual, a precisão e significância tornam-se quase que características mutuamente exclusivas. A classificação de objetos encontrados ao nosso redor nem sempre é compatível com a lógica aristotélica. Por exemplo, a classe dos animais claramente inclui instâncias tais como cães, cavalos, pássaros e também exclui claramente objetos tais como rochas, fluidos e plantas. Não obstante, objetos tais como estrelas do mar e algumas bactérias terão um estatus ambíguo no que diz respeito à classe de animais, como explicitado por ZADEH [ZADEH 1965].

A lógica nebulosa provou ser capaz de aproximar complexos sistemas não lineares, com

poucas regras de termos linguísticos e aproximados, tal como “frear pouco se o muro está perto” [CRUZ 2004]. É uma lógica de fácil manuseio, robusta, que trabalha de forma paralela e, na falta de regras, acumula evidências contra e a favor das proposições. A lógica nebulosa estende a lógica clássica incluindo o conceito de verdade parcial, valores entre *totalmente verdadeiro* e *totalmente falso*.

### 2.1.2 Conjuntos Nebulosos

A teoria nebulosa permite que um elemento pertença a mais de um conjunto com respectivos graus de inclusão. A transição deste elemento de um conjunto para outro ocorre de forma gradual. Um conjunto nebuloso pode ser definido pela sua função de inclusão  $\mu(x)$  pertencente ao intervalo  $[0,1]$  [ZIMMEMANN 1985]. A figura abaixo mostra um exemplo de conjuntos nebulosos.

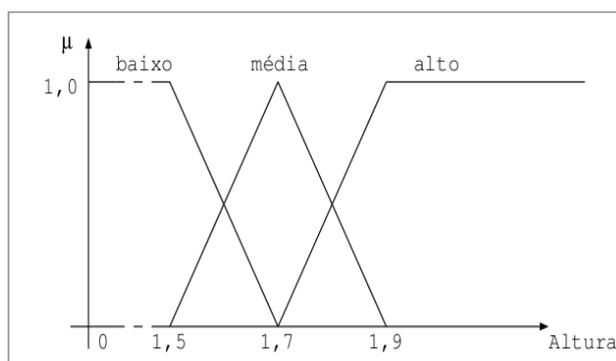


Figura 2.1 Conjuntos nebulosos para “Estatura Média” [CRUZ 2004].

Na figura 2.1 são mostrados três conjuntos nebulosos, baixo, média e alto. Sendo que o conjuntos baixo e alto possuem a função de inclusão no formato de um trapézio e o conjunto média está na forma de um triângulo.

### 2.1.2.1 Função de inclusão

Função de inclusão é um operador matemático que define o quanto um elemento pertence a um conjunto (grau de pertinência). Existem diversas representações para a função de inclusão, como mostradas nas figuras abaixo, mas na maioria das vezes essas representações são do tipo unimodal, garantindo a influência local para uma variável do problema. Não existe um método único e correto para escolher a função de inclusão; essa escolha pragmaticamente acontece via o método de “tentativas e erros”. No entanto, existem algumas técnicas artificiais que podem ajudar nessa questão, tal como as redes neurais artificiais.

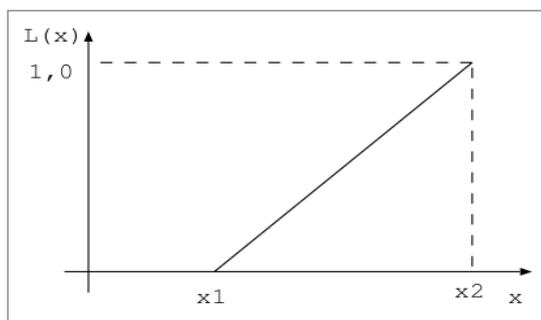


Figura 2.2 Função linear crescente [CRUZ 2004].

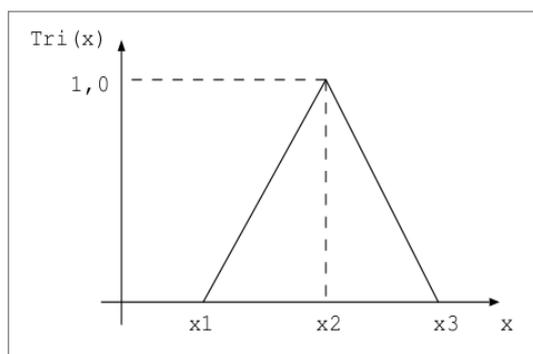


Figura 2.3 Função triangular [CRUZ 2004].

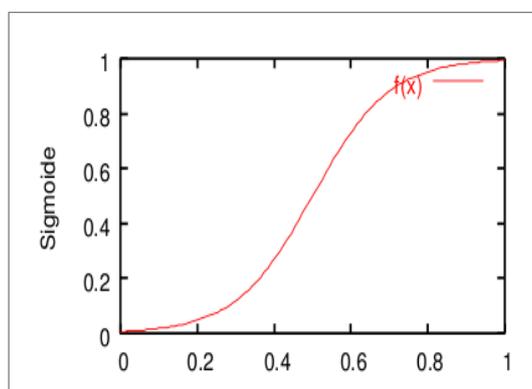


Figura 2.4 Sigmoide crescente. [CRUZ 2004].

Devido ao fato de que os estudos relacionados com a migração de aves contêm uma quantidade significativa de informações aproximadas e expressas em termos de variáveis linguísticas, defendemos neste trabalho que as medidas coletadas em vôos migratórios de aves, por serem normalmente imprecisas, são mais bem manipuladas se forem tratadas por um modelo nebuloso, pois que estamos falando de uma metodologia flexível, de fácil aplicação e de singeleza nas operações de seus conceitos. Particularmente, é sabido que uma equação diferencial (normalmente bastante complexa) pode reproduzir (matematicamente) a compensação à deriva do vento, entretanto, nós advogamos que para problemas dessa natureza o uso de modelos nebulosos pode substituir, com sucesso, controles até então regidos exclusivamente por equações diferenciais.

## 2.2 Abordagem Lagrangeana

Nascido em Turim no século XVIII, o brilhante físico-matemático Joseph Louis DE LAGRANGE contribuiu significativamente para o desenvolvimento da matemática moderna, consolidando algumas teorias abrangidas pelo cálculo das variações. Aos vinte e três anos LAGRANGE já demonstrava sua genialidade associando o cálculo diferencial à teoria das probabilidades. Mais recentemente as diversas contribuições de LAGRANGE vêm sendo aplicadas em distintas áreas compreendidas pela ciência moderna, tal como a mecânica quântica na qual ela cada vez mais vêm ganhando espaço com aplicações difusas e importantes. A mecânica lagrangeana também tem sido útil como ferramenta em diferentes engenharias e aplicações tecnológicas, como, por exemplo, dando suporte à construção de modelos computacionais capazes de simular a dinâmica de uma mancha de óleo sobre o mar [GOBIRA 2008].

A migração de aves tem algumas peculiaridades assaz interessantes, tal como o “mesmo destino” em inúmeras jornadas migratórias feitas por aves recém-nascidas, dotadas de uma orientação muito eficiente e até hoje não muito compreendida. As tentativas em explicar fenômenos dessa natureza, estão geralmente fundamentas nas teorias de otimização energética, que induzem que (em determinadas configurações) as aves tentem sempre minimizar seus gastos energéticos. A mecânica lagrangeana pode ser bem apropriada nesse tema em estudo, pois ela consiste de um formalismo escalar e é apropriada para representar a dinâmica de corpos vinculados, como é o caso da ave em migração com um destino fixo (objetivo final do vôo). Esse formalismo, que é compatível com cálculo variacional, pode recorrer ao princípio da “mínima ação” quando for necessário escolher uma trajetória ótima para a dinâmica da ave em migração, o que leva a obter a trajetória de menor custo energético ou uma trajetória mais curta no vôo de uma ave com um objetivo fixo.

A mecânica lagrangeana, formulada a partir da definição da energia total do

sistema, e de natureza escalar, pode ser representada pela lagrangeana  $L = T - V$ , onde  $T$  representa a energia cinética e  $V$  a energia potencial. A dinâmica do movimento de corpos sujeitos a vínculos (por exemplo, um trem sobre um trilho) nem sempre tem solução simples quando abordada pela mecânica newtoniana; neste formalismo o tempo é visto como uma variável canônica. A mecânica lagrangeana é fundamentada no princípio de d'ALAMBERT e está enraizada no conceito de coordenadas generalizadas introduzidas por LAGRANGE, e tem a vantagem adicional de não envolver as forças de vínculo. O trabalho realizado pela força de vínculo por ocasião de um deslocamento virtual da partícula é considerado nulo, mesmo que a superfície esteja em movimento. Isso difere do trabalho realizado durante um deslocamento real, que não é necessariamente nulo [LEMOS 2010].

Os deslocamentos virtuais são transições infinitesimais de cada partícula que levam de uma configuração possível a uma outra infinitesimalmente próxima. As características definidoras dos deslocamentos virtuais são:

- ( i )      são infinitesimais;
- (ii)      ocorrem num instante  $t$  fixo;
- (iii)     não violam os vínculos.

### **2.2.1 Princípio de d'ALAMBERT**

Enquanto as forças de vínculo asseguram as restrições geométricas, as forças aplicadas possibilitam os movimentos. O princípio de d'ALAMBERT é um método de escrever as equações de movimento exclusivamente em termos das forças aplicadas onde o trabalho virtual das forças de vínculo é nulo. No caso de sistemas vinculados, o princípio de d'ALAMBERT constitui um avanço relativo à formulação newtoniana porque exclui qualquer referência às forças de vínculos [LEMOS 2010].

## 2.2.2 Princípio dos trabalhos virtuais

Em um sistema constituído por  $i$  partículas em equilíbrio estático tem-se que  $F_i = 0$ , onde  $F_i$  é a força total sobre a  $i$ -ésima partícula, para qualquer que seja o deslocamento virtual  $\delta r_i$ , de tal forma que o trabalho virtual das forças de vínculos é nulo e temos então condições de escrever as equações de movimento a partir das forças aplicadas. Segundo d'ALAMBERT, cada partícula  $i$  em equilíbrio está sob influência de uma “força efetivamente invertida” semelhante à força de inércia existente no referencial que acompanha o movimento da partícula [LANCZOS 1970, SOMMERFELD 1952].

## 2.2.3 Coordenadas generalizadas

Devido ao fato de os  $\delta r_i$  não serem independentes entre si, o princípio de d'ALAMBERT requer trabalhar com mais coordenadas do que o necessário para o formalismo newtoniano. É possível introduzir  $n$  variáveis independentes  $q$ 's denominadas coordenadas generalizadas:

- (a) o vetor posição de cada partícula é determinado univocamente em cada instante pelos valores dos  $q$ 's;
- (b) os vínculos (supostos todos holônomos) são identicamente satisfeitos se expressos em termos dos  $q$ 's.

O espaço de configuração é o conjunto de valores atribuídos às coordenadas generalizadas como eixos coordenados e sua estrutura matemática de variedade de diferenciáveis sugere o termo *variedades de configuração* (cada conjunto de valores

atribuídos às coordenadas generalizadas) definindo uma configuração do sistema para cada instante.

### 2.2.4 Potencial dependente das velocidades

Trata-se de um potencial relacionado com uma classe de forças diferente e mais ampla do que o conjunto de forças conservativas. A função dissipativa introduzida por RAYLEIGH em 1978 considera a dissipação de energia do sistema a partir de forças derivadas de potenciais velocitivos.

Como em nosso trabalho pretendemos prever os ajustes no movimento de uma ave em migração, através de uma simulação de seu vôo, faz-se necessário obter a equação de movimento da ave. A mecânica newtoniana já foi utilizada para essa finalidade (resultando em uma equação nada trivial), por isso optamos por recorrer ao formalismo lagrangeano para obter a equação de movimento da ave. A fim de descrever essa equação de movimento, ainda que genericamente (pois que não é esse o objetivo de nosso trabalho) usando o formalismo lagrangeano, iremos primeiro deduzir as equações de LAGRANGE e, em seguida, encontrar a lagrangeana que propomos para o vôo de uma ave vinculada a um objetivo fixo.

### 2.2.5 Trabalho virtual

Podemos decompor a “força total”  $F_i$  sobre a  $i$ -ésima partícula do sistema sujeita às forças aplicadas  $F_i^a$  e forças de vínculos  $f_i$ , do seguinte modo:

$$F_i = F_i^a + f_i \quad (2.1)$$

Para um sistema em equilíbrio estático, no qual  $F_i=0$ , aplicando-se deslocamentos virtuais  $\delta r_i$ , tem-se :

$$\sum_i F_i \cdot \delta r_i = 0 \quad (2.2)$$

Ao inserir a equação 2.1 na equação 2.2, e considerando que o trabalho das forças de vínculos é nulo, podemos escrever o sistema vinculado exclusivamente em termos das forças aplicadas, usando o princípio do trabalho virtual:

$$\sum_i F_i^a \cdot \delta r_i = 0 \quad (2.3)$$

e a partir deste enunciado pode-se estender o princípio de d' d'ALAMBERT, onde  $\dot{\mathbf{p}}$  é a força efetiva:

$$\sum_i (\dot{\mathbf{p}}_i - F_i^a) \cdot \delta r_i = 0 \quad (2.4)$$

### 2.2.6 Equações de LAGRANGE

Em sistemas holônomos é possível introduzir um certo número  $n$  de variáveis independentes  $q_1, \dots, q_n$  definidas como coordenadas generalizadas. Desta forma, podemos expressar os deslocamentos virtuais  $\delta r_i$  em termos dos deslocamentos virtuais independentes  $\delta q_k$  (equação 2.5) considerando que o tempo permanece fixo.

$$\delta \mathbf{r}_i = \sum_k \left( \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \right) \delta q_k \quad (2.5)$$

Assim, o trabalho virtual das forças aplicadas torna-se:

$$\sum_i \mathbf{F}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i = \sum_i \sum_k \mathbf{F}_i \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \right) \delta q_k \equiv \sum_k Q_k \delta q_k \quad (2.6)$$

de onde temos, por definição, a  $k$ -ésima componente da força generalizada:

$$Q_k = \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \right) \quad (2.7)$$

Os  $q$ 's não possuem necessariamente dimensão de comprimento e os  $Q$ 's não possuem necessariamente dimensão de força. Contudo, o produto  $Q_k \delta q_k$  sempre possui dimensão de trabalho.

A outra quantidade envolvida no princípio de d'ALAMBERT é

$$\sum_i \dot{\mathbf{p}}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i = \sum_i m_i \dot{\mathbf{v}}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i = \sum_{i,k} m_i \dot{\mathbf{v}}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \delta q_k \quad (2.8)$$

A seguinte identidade será útil para demonstrar a força generalizada  $Q_k$

$$\sum_i m_i \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} = \sum_i \left\{ \frac{d}{dt} \left( m_i \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \right) - m_i \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \right) \right\} \quad (2.9)$$

No ultimo termo de (2.9) podemos usar o resultado

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \right) = \sum_l \frac{\partial}{\partial q_l} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \right) \dot{q}_l + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \right) = \frac{\partial}{\partial q_k} \left( \sum_l \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_l} \dot{q}_l + \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial t} \right) = \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial q_k} \quad (2.10)$$

e passamos a tratar  $q$ 's e  $\dot{q}$ 's como grandezas independentes, de modo que as derivadas parciais em relação aos  $q$ 's tratam os  $\dot{q}$ 's como constantes e vice-versa.

Alem disso deduz imediatamente que

$$\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial \dot{q}_k} = \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \quad (2.11)$$

Desta forma podemos escrever (2.9)

$$\sum_i m_i \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} \quad (2.12)$$

Onde

$$T = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2 \quad (2.13)$$

Por fim, podemos escrever exclusivamente em termos dos  $q$ 's e  $\dot{q}$ 's as equações de Lagrange para as  $n$  coordenadas generalizadas, em termos da energia cinética  $T$  e das componentes  $Q_k$  (força generalizada).

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k \quad (2.14)$$

onde  $k = 1, \dots, n$ .

## 2.3 Sistemas bio-inspirados

São sistemas constituídos de teorias fundamentadas em observações encontradas na natureza. Essas “inspirações” surgem desde o comportamento de indivíduos de complexidade celular rudimentar (tais como a maioria das bactérias) até células altamente complexas e “obscuras” (tais como os neurônios humanos). Muitas inovações tecnológicas têm obtido grande sucesso no desenvolvimento de sistemas bio-inspirados, tal como alguns exemplos de otimização de algoritmos que foram fundamentados na busca de alimento realizada por colônias de formigas, ou ainda a conglomeração de robôs cujos comportamentos são inspirados nos de cardumes ou nos de bandos de aves em movimento.

Nesse contexto, temos a “computação bio-inspirada” que se deseja eficiente na resolução de problemas complexos (com grande número de variáveis ou com explosão combinatória em suas soluções), ou quando não é possível garantir que a solução encontrada é ótima embora seja possível propor métricas de comparação entre as

soluções candidatas, ou ainda quando uma única solução não é suficiente.

### 2.3.1 Sistema biologicamente realista

Sistemas biologicamente realistas vêm sendo cada vez mais utilizados em implementações de técnicas consideradas inteligentes. Basicamente, um modelo computacional biologicamente realista consiste em fundamentar determinados programas através do estudo e conhecimentos sobre uma configuração biológica. O paradigma da simulação de sistemas biológicos pode variar entre *totalmente realista* e *parcialmente realista*, e tanto que o grau de realismo possa ser determinado pelo aumento significativo da similaridade com o real. Considera-se um sistema *totalmente irrealista* aquele que não apresenta nenhuma relação coerente com a dinâmica observada em um sistema biológico real. É consenso que o conhecimento total sobre as propriedades de um ecossistema é necessariamente incompleto, o que restringe a idéia de um modelo computacional fidedigno e completo. Dessa forma, tem sido plausível (e compreensível) se aceitar o uso de modelos computacionais que proporcionem respostas parcialmente realistas e que sejam parcialmente fidedignos ao sistema biológico.

### 2.3.2 Inteligência de enxame

A expressão *Swarm Intelligence* foi primeiramente utilizada por BENI, HACKWOOD e WANG no contexto de sistemas de células robóticas [HACKWOOD and BENI 1991, 1992, BONABEAU 1999, NICOUD 2009]. Muitos agentes simples ocupam um ambiente para gerar conhecimento e se auto-organizar por meio de interações com seus vizinhos mais próximos. Admite-se que as bactérias são os seres “inteligentes” mais simples, desde que “inteligência” seja definida como capacidade de se auto-organizar [GARNIER 2007]. Muitos animais se locomovem na natureza em grupos realmente organizados, tais como aves em migrações sazonais, insetos e formigas em suas buscas otimizadas por alimento, ou ainda as “ligeiras fugas” realizadas por

cardumes de peixes sendo atacados por predadores. Os movimentos desses grupos de animais são normalmente auto-organizados e inteligentes se comparados, por exemplo, com a locomoção humana quando em fuga requerida por uma situação emergencial de pânico. Modelos com técnicas descentralizadas, flexíveis e sistemas artificiais robustos têm obtido avanços significativos, principalmente aqueles com princípios fundamentados no comportamento coletivo de insetos sociais. Um inseto é sim um ser bastante complexo e sua decisão é geralmente influenciado por uma diversidade de estímulos normalmente obtidos através de informações geradas a partir da interação com outros insetos da mesma colônia. Contudo, se observarmos um inseto individualmente, isso ainda não nos torna capaz de entendermos as complexidades do que suas colônias são capazes de realizar, sendo intrincado estabelecer uma associação entre o comportamento individual do inseto àquele do resto da colônia [BONABEAU 1990].

Um agente autônomo normalmente não segue a ordem de um líder ou a um plano global [FLAKE 1999]. Por exemplo, para um pássaro participar de um bando de vôo ele só necessita de ajustar seu movimento em coordenação com os vizinhos mais próximos pertencentes ao bando, permanecendo próximo dos outros indivíduos e evitando a colisão. Não existe um pássaro líder no bando, ou melhor, se existe um pássaro líder ele pode ser substituído sistematicamente por outro integrante do bando. A abelha rainha em uma colméia é um exemplo bem conhecido da substituição de um líder em seu meio coletivo, pois quando a rainha é retirada da colméia as abelhas operárias elegem outra abelha rainha. Esse comportamento coletivo permite que o agente (pássaro, abelha, etc.) tenha diversas vantagens, tal como, economia de energia em vôos estratégicos realizados em possíveis fugas [NOGUEIRA 2007].

Propostos na década de 90, algoritmos ótimos, inspirados no comportamento de colônias de formigas, têm proporcionado uma enorme contribuição à área de modelagem computacional. A robótica, em particular, tem obtido grande proveito através de pesquisas em biorrobótica. A simulação do comportamento de insetos sociais tem mostrado que a interação coletiva destes agentes pode ser reproduzida através de regras

simples a serem utilizadas no comportamento individual. Por exemplo, uma colônia de insetos sociais é, sem dúvida, um sistema descentralizado de resolução de problemas, composta por muitas entidades que interagem de modo relativamente simples.

Desta forma, sistemas descentralizados têm vantagens em distribuir tarefa entre agentes que, individualmente, são regidos por regras simples, inspirando modelos computacionais de baixo custo. Ao estudar atentamente o comportamento individual e combinando observações comportamentais com modelagem matemática e simulação, estamos em condições de compreender os mecanismos subjacentes ao comportamento coletivo em sistemas biológicos [BEEKMAN 2008].

## **3- VÔOS DE AVES SAZONAIS MIGRATÓRIAS: CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES**

### **3.1 Vôos migratórios**

#### **3.1.2 Histórico**

Desde a década de 40 pesquisas sobre a migração de aves e sua dependência com fatores climáticos vêm sendo publicadas por pesquisadores. Em particular, os holandeses DEELDER e TINBERGEN [DEELDER and TINBERGEN 1947] fizeram importantes observações e demonstraram a influência da direção e velocidade do vento na altitude dos vôos das aves migratórias *Fringilla coelebs* e *Sturnus vulgaris*. Algumas informações recentes sobre a mudança na altitude de aves migratórias no ártico são encontradas também em [HEDENSTROM 2002]. Alguns pesquisadores têm também abordado diferentes peculiaridades deste tema de estudo e diversos modelos matemáticos foram criados em paralelo [PENNYCUICK 1975, ALERSTAM 1979, HEDENSTROM 2002, LIECHTI 1995].

Em 1966, EVANS criou um modelo matemático que analisa a densidade de migração diurna de aves. Foi observado que aves de todas as espécies de migração diurna têm a direção de vôo influenciada pela altitude na qual estão voando [EVANS 1966]. Neste estudo foram utilizadas medidas coletadas visualmente (com binóculos) para as aves voando em baixa altitude e medidas registradas por radares para aves voando em altitudes mais elevadas (e não perceptível por binóculos). Foram realizadas comparações

em relação ao comportamento da ave *Chaffinch* que demonstraram a influência da altitude de vôo na direção de migração. No fim da década de 60, PENNYCUICK [PENNYCUICK 1968] introduziu um modelo interessante sobre o consumo energético requerido pelas aves migratórias, modelo este utilizado à posteriori por muitos pesquisadores [LIECHT 1995, P. HENNINGSSON 2009]. Frustrações ocorridas com medidas provenientes de radar são freqüentemente relatadas desde a década de 60, como mostram os trabalhos [AXELL 1963, WILCOCK 1964, LIECHT 1995 e GREEN 2002].

### **3.1.3 Variáveis significativas para a migração**

A estratégia adotada por uma ave para compensar o vento lateral que a atinge em sua jornada migratória pode ter diferentes causas. Entre essas causas estão o custo do transporte, a distância restante para o objetivo fixo, a visibilidade momentânea, o risco de chegar muito atrasada na invernada prenunciada, a escassez de alimentos nas áreas abaixo de sua trajetória. Ademais, isto pode também variar de acordo com as espécies das aves e com as idades delas [ALERSTAM 1979, LIECHTI 1995]. Desta forma, percebe-se que existe uma complexidade não negligenciável para determinar o comportamento destas aves, uma propriedade que ainda não está totalmente bem compreendida [KARLSSON 2010]. As correntes de ventos existentes durante o vôo da ave e a variação da velocidade desses ventos são fatores decisivos para a estratégia dessa ave para obter uma trajetória otimizada, pois requerem uma “análise” das vantagens e desvantagens em adotar um determinado procedimento de compensação à deriva do vento quando esta for requerida.

É muito natural esperar que o vento seja um dos agentes seletivos mais importantes na migração das aves. PENNYCUICK [PENNYCUICK 2008] demonstrou que as aves migratórias tendem a aumentar sua velocidade de vôo quando um vento contrário a atinge e, por outro lado, reduzi-la quando ventos a favor a empurram. Isto

minimiza o gasto energético por unidade de distância percorrida. Este fenômeno na variação intensa de curto prazo na atividade migratória está claramente confirmado por RAVELING [RAVELING 1984], que demonstra o quanto o vento tem importância fundamental na explicação deste fenômeno na trajetória da ave migratória. ALERSTAM [ALERSTAM 1979] alerta que são esperados diferentes graus de seletividade dos ventos para as diversas espécies de aves existentes.

### **3.1.4 A Compensação da deriva**

A compensação completa da deriva do vento (quando o ângulo entre o rastreamento da ave e o vetor distância inicial é zero) é ideal quando a variação na velocidade do vento é insignificante, caso contrário o ideal é uma compensação parcial e flexível [ALERSTAM 1979]. Sendo assim, uma das possibilidades estratégicas para a ave migratória não escolher o caminho mais curto (compensação completa da deriva do vento) está no fato de existirem ventos a favor que em outras circunstâncias aumentam a velocidade dela em relação ao solo. Desta forma, se a favorabilidade dos ventos durante o restante do percurso para o objetivo não diferir nos diferentes pontos possíveis de um voo parcial, torna-se óbvio que a ave migratória deve direcionar seu voo minimizando a distância restante até o objetivo. A deriva do vento total ou parcial parece ser o padrão mais comum na migração de aves passeriformes noturnas (KARLSSON, 2010).

Uma equação de ajuste ótimo na velocidade e direção no voo durante a migração, em relação às despesas de energia e influência do vento, foi proposta e demonstrada por LIECHTI em 1995 [LIECHTI 1995]. Ele revela que o comportamento compensatório da ave tem um grau de dependência significativa em relação à distância até o objetivo final e ainda que o ângulo de compensação a ser imposto diminua quando a ave se aproxima desse objetivo.

### **3.1.5 Compensação da influência do vento lateral em função da distância ao objetivo**

O modelo matemático introduzido por ALERSTAM [ALERSTAM 1979] é considerado o primeiro modelo sobre aves migratórias a levar em consideração ambos, a deriva do vento lateral e a distância restante a um objetivo fixo. Baseado neste trabalho, LIECTH [LIECTH 2004] obteve sucesso ao expandir os enunciados de ALERSTAM, mas focando sua pesquisa na tentativa de encontrar a melhor estratégia que minimizasse o gasto de energia em função do vento lateral e de um objetivo fixo. Foram encontrados efeitos significativos para todas essas variáveis, porém os dados utilizados nestes estudos não foram considerados absolutamente confiáveis porque não evitam os *pseudodrift* (direções divergentes de diferentes contingentes de indivíduos migrando sob diferentes objetivos) para a variável “compensação da deriva do vento”.

Outros cientistas, tal como HEDENSTRÖM, têm explorado as questões inerentes ao comportamento de aves migratórias, como a influência da variação do módulo da velocidade do vento na velocidade da ave no ar, altitude de vôo e a velocidade vertical da ave [HEDENSTRÖM 2002].

### **3.1.6 Rastreamento da Ave *Apus apus***

O risco de *pseudodrift* é minimizado no trabalho de [KALSSON 2010] pelo simples fato de que as batidas das asas da *Apus apus* são bem conhecidas e de fácil rastreamento pelos radares. Também são evitados os erros provenientes de fatores trigonométricos e fatores estatísticos propostos por GREEN e ALERTAM [GREEN and ALERTAM 2002]. Os estudos medindo a orientação na migração noturna de andorinhões não apresentaram diferença na compensação da deriva do vento entre as estações de

outono e primavera, ou seja, quando as aves estão respectivamente perto e longe do objetivo fixo. Foi utilizado um radar para rastrear as aves e balões de hélio para determinar as condições do vento (direção e velocidade) na altitude do vôo [KARLSSON and ALERSTAM 2010].

A cada dois segundos foram coletados dados, medidas de altitude, direção, azimute e distância em relação ao radar no período de um minuto de rastreamento para um indivíduo (*Apus apus*) pertencente ao bando em sua migração sazonal. Foram utilizados intervalos de dez segundos para o cálculo da direção média (*track direction*) de vôo e velocidade média de vôo em relação à terra, ou seja, a cada minuto foram calculadas as resultantes das seis parciais direções e velocidades de vôo, onde a cada trinta segundos era atualizada a direção e velocidade do vento. Os dados foram devidamente tratados, permitindo assim encontrar o aumento da velocidade equivalente em função do vento lateral. A direção de vôo da ave no ar (*heading direction*) pode ser expressa pela subtração das medidas *track direction*, que representam o deslocamento da ave em relação à terra e a direção do vento.

## **3.2 Simuladores para aves artificiais**

### **3.2.1 Histórico**

Simuladores têm sido de extrema importância para o estudo sobre os vôos de aves migratórias e têm contribuindo na eficiência e segurança do tráfego aéreo, assim como têm também sido utilizados em testes prévios para implantações de sistemas robóticos. No âmbito da inteligência coletiva uma das principais contribuições da engenharia para os biólogos foi sem dúvidas a construção de simuladores [NOGUEIRA 2007]. Um dos primeiros simuladores inteligentes capazes de reproduzir o movimento coletivo de aves foi construído por REYNOLDS [REYNOLDS 1987] que demonstrou que com três

regras simples pode-se simular o comportamento complexo do vôo coletivo tridimensional livre de colisão.

Muitas técnicas foram aplicadas na ambição de expandir o excelente trabalho de REYNOLDS. A teoria nebulosa tem sido utilizada com bastante sucesso em alguns trabalhos correlatos, tal como os de BAJEC [BAJEC 2003, 2005]. BAJEC conseguiu formar ótimos clusters de movimentos, demonstrando, dessa forma, a adequabilidade de uma teoria “ambígua e imprecisa” para controlar o movimento coletivo de um bando de aves artificiais. Entretanto, alguns trabalhos não obtiveram o mesmo sucesso usando a teoria nebulosa, embora tivessem conseguido reproduzir vôos de linha no formato *V-like*, utilizando, como REYNOLDS, um conjunto de três regras [NATAN e BARBOSA 2007].

### **3.2.2 Consumo energético de uma ave em migração**

Desde a década 80 PENNYCUICK 1978 vem desenvolvendo um simulador para o vôo de aves migratórias. Constitui-se na realidade de um sistema que incorpora e transcreve os conceitos da mecânica de vôo de aerodelos para a mecânica de vôo para aves, permitindo ao usuário aplicá-las em uma ave genérica instanciada. Atualmente esse simulador responde perguntas sobre velocidade, distância, consumo de energia e algumas questões sobre desempenhos. É basicamente um conjunto de regras físicas que regem o sistema em geral, no sentido de que eles podem ser aplicados a qualquer ave, real ou hipotética [PENNYCUICK 2008].

### **3.2.3 Aplicação em radares**

Simuladores “inteligentes” vêm sendo utilizados em radares de tráfego aéreo, notadamente em países que se situam na rota de aves migratórias noturnas. Isso contribui

para detectar as possíveis rotas migratórias existentes e estrategicamente viáveis para as aves em migrações, como é o caso do radar *Mpradar* na Holanda [BOUTEN 2003]. Esse radar utiliza o modelo de migração proposto por BRUNDERER [BRUNDERER 2003] que prediz a decolagem de aves em função das condições meteorológicas e custo energético requerido pela ave [ERNI, BRUDERER and LIECHTI 2003]. Outros trabalhos têm contribuído com os avanços na detecção de aves migratórias [DOKTER 2010].

### 3.2.4 Simuladores para um bando de aves artificiais

A simulação do movimento total do bando de aves é geralmente criada por um modelo distribuído de comportamentos, muito parecido com o movimento de bandos de aves encontrados na natureza, nos quais cada ave escolhe o seu próprio curso de acordo com a mudança dinâmica do ambiente [REYNOLDS 1987]. Os indivíduos se separam do bando para evitar colisão com obstáculos fixos, mas estes desvios são necessários para manter a “naturalidade” do voo.

Um dos pioneiros em simular o movimento coletivo de aves foi REYNOLDS [REYNOLDS 1987] que utilizou um conjunto (simples) de três regras:

1. **Evitar Colisão:** evitar colisões com os companheiros próximos pertencentes ao bando;
2. **Correspondência na velocidade:** tentativa de sincronizar a velocidade com os companheiros próximos pertencentes ao bando;
3. **Centralização do bando:** tentativa de ficar perto dos companheiros próximos pertencentes ao bando.

### Simulação do *V-like*

O trabalho de NATAN e BARBOSA simula uma configuração espacial tridimensional do tipo *V-like*, que é facilmente encontrado na natureza em vôos para bandos de ave, principalmente as de grande porte. Foi mostrado que a formação em *V-like* fornece um ganho energético significativo e que pode ser facilmente compreendido a partir de um conjunto de regras simples [NATAN e BARBOSA 2007].



Figura 3.1 – *V-like*

Duas linhas distintas de pensamento surgiram na literatura para explicar este formato *V-like* de vôo. A primeira demonstra que a aerodinâmica de vôo das aves proporciona regiões privilegiadas chamadas de *upwash*, sendo o principal motivo do formato *V-like* para aves de grande porte. A segunda linha propõe que a finalidade está fundamentalmente no ganho visual. Neste sentido, o alinhamento em *V-like* proporcionaria uma melhor visão parcial para cada indivíduo, o que ajuda a evitar colisões com os companheiros de bando. Há também de se considerar que, além desses, existem benefícios aerodinâmicos embora não tão relevantes para aves de pequeno porte.

NATAN e BARBOSA exploram a existência de regras de posicionamento que possibilita

bandos de aves artificiais convergirem ao formato *V-like* e pelo fato de que essas regras devem estar em concordância com as hipóteses sobre os benefícios aerodinâmicos referentes ao *upwash* e a visibilidade. Em adição, deve ser considerada a característica inata da ave em voar em bando e a visibilidade lateral como uma das necessidades para a orientação no posicionamento no bando de vôo.

Assim sendo, são extraídas três regras básicas:

- 1. Buscar a proximidade de outra ave;**
- 2. Se a Regra 1 não é mais utilizada então encontrar a posição mais próxima da outra ave mas que ofereça visibilidade longitudinal;**
- 3. Aplicar a Regra 2 enquanto não se tem visibilidade ou o esforço para acompanhar o grupo diminui devido ao aumento do *upwash*.**

Estas três regras simples representam quais são os princípios cada indivíduo do bando deve seguir. As regras 1 e 2 distinguem dois modos de comportamento, as regras 2 e 3 implicam em que a entrada sensorial que direciona a ave não é só visual mas também a facilidade com que a ave consegue acompanhar o grupo deve ser considerada. Todas as três regras fazem referência a uma região do espaço (aqui assume-se que a ave tem um *campo de visão*  $< 180^\circ$ ). As regras 1 e 3 referem-se a uma região fechada ao redor de cada ave, sendo que a ou proximidade é alcançada ou o *upwash* é encontrado.

A figura 3.2 mostra a região *upwash* onde o círculo preenchido representa o corpo da ave e as retas representam suas respectivas asas, desta forma a ave  $i$  se beneficia com o *upwash*  $U^+_j$ .

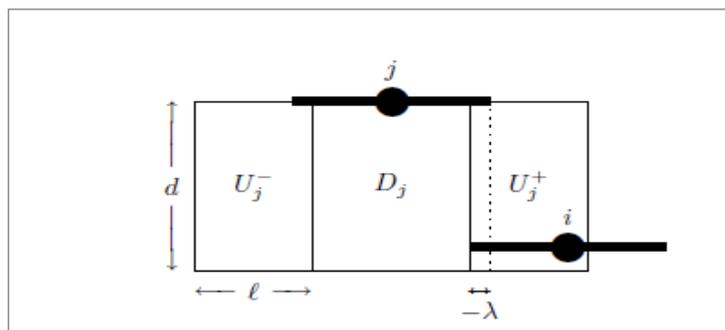


Figura 3.2 - Regiões upwash ( $U^-_j$  e  $U^+_j$ ) e downwash ( $D_j$ ).  
[NATAN e BARBOSA, 2007].

Se a ave  $i$  obedece à regra 1 ao aproximar-se da ave  $j$  então a ave  $j$  está contida em  $U^-_j$ ,  $D_j$  e  $U^+_j$ . Para satisfazer à regra 3 a ave deve concomitantemente ter qualquer parte da asa ou corpo em  $U^-_j$  ou  $U^+_j$  e não estar presente na região  $D_j$ . Neste caso o posicionamento ideal ocorre quando a separação lateral é  $\lambda = (\pi/4 - 1)\omega/2$  aproximadamente  $-0.1073\omega$ , onde  $\omega$  representa a envergadura da asa (*Wingspan*). A constante  $\lambda$  representa a sobreposição da distância entre as duas asas e pode ser calculada a partir da consideração de que as duas asas de uma ave correspondem ao diâmetro de uma circunferência de raio unitário.

## 4 – PREDIÇÃO DE AJUSTE EM VÔOS PARA AVES MIGRATÓRIAS SAZONAIS NOTURNAS

### 4.1 Força de NEWTON

#### 4.1.1 Consumo de energia requerida pela ave

Todos os animais que voam podem gerar *downwash* e suportar o seu peso em vôo nivelado, mantendo o equilíbrio com a força gravitacional em vôos desacelerados, desde que a taxa de impulso ascendente seja igual ao peso da ave. O gasto de energia de uma ave migratória foi estudado pelo biólogo PENNYCUICK [PENNYCUICK 2008] que fundamenta suas deduções a partir da dinâmica de vôo de aeromodelos. Nos estudos sobre artefatos voadores geralmente o gasto de energia para sustentar o artefato no ar (compensar a força da gravidade) e superar o arrasto (força para vencer o atrito do fluido em que o artefato está imerso) é muito bem descrito. PENNYCUICK estendeu os estudos aplicados aos aeromodelos para o vôo animal de tal maneira que as constantes encontradas na equação de consumo energético podem ser substituídas pela morfologia da ave: a potência necessária para o vôo horizontal de uma ave é uma estimativa da taxa, na qual os músculos da ave têm que fazer trabalho mecânico. Essa potência depende de um pequeno conjunto de atributos, como, por exemplo, a massa da ave, a extensão da asa e o aspecto aerodinâmico do corpo.

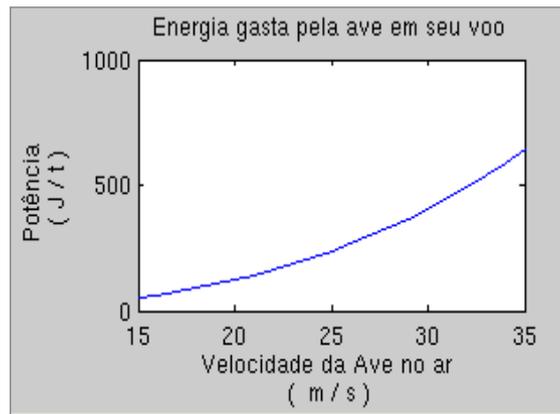


Figura 4.1 - Potência requerida no vôo da ave Apus apus

O mínimo da curva de potência  $dP(V_{mp})/dv$ , significa que a ave está consumindo a mínima energia necessária para manter o nível (altitude) de vôo e velocidade constante, onde  $V_{mp}$  representa a velocidade da ave que consome o mínimo de energia, sendo que uma velocidade inferior a  $V_{mp}$  é inerentemente instável, enquanto que a velocidade que exige a mesma quantidade de energia acima de  $V_{mp}$  é estável. Isso ocorre porque uma ave que está exercendo exatamente esta quantidade de energia para manter uma velocidade constante que está abaixo  $V_{mp}$  necessitará de um pouco menos de energia do que antes caso uma rajada de vento, ou algum outro distúrbio, faça com que ela tenha que acelerar ligeiramente [PENNYCUICK 1975, 1978]. A não ser que a ave responda muito rapidamente reduzindo sua potência de saída, ela estará gastando mais energia do que é necessário para manter a nova velocidade e isso fará com que ela acelere ainda mais, até que ela atinja a velocidade por parte crescente da curva de potência (acima de  $V_{mp}$ ) na qual a potência requerida é mais uma vez a mesma potência que ela exerce [PENNYCUICK 2008], como mostra a equação 4.1, onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  estão associados à morfologia da ave.

$$P = a + \frac{b}{V_a} + cV_a^3 \quad (4.1)$$

O gasto de energia pela ave pode ser decomposto em três parcelas distintas, a primeira parcela representa a energia gasta para suportar o peso e é nomeada pela constante  $a$ , a segunda é a parte gasta para vencer o arrasto sofrido pela corpo da ave e representada por  $b/V_a$  e, por ultimo  $cV_a^3$  que é a parte gasta para vencer o arrasto da asa.

#### **4.1.2 Compensação da deriva do vento com objetivo fixo e distância restante**

Como demonstrado por ALERSTAM [ALERSTAM 1979], o comportamento compensatório de uma ave tem uma dependência significativa com a distância até o objetivo fixo, com o ângulo de compensação diminuindo à medida que a ave se aproxima desse objetivo. O vôo de uma ave sob a influência do vento (e tendo um objetivo fixo) é representado pela figura 4.2. As aves migratórias devem permitir uma grande deriva (*drift*) quando estão longe do objetivo e diminuir gradualmente essa deriva compensando com a direção de vôo no ar (*ângulo*  $\gamma$ ) quando se aproximam desse objetivo, até que essa compensação esteja completa. Sob a influência de ventos constantes uma ave migratória deve compensar completamente o deslocamento causado pelos ventos, sendo que uma das vantagens da compensação completa de um vento lateral é a diminuição do tempo e do custo energético associados à trajetória. Sob a influência de condições atmosféricas mais tranquilas (ventos calmos) uma boa estratégia é minimizar a distância restante.

A figura 4.2 mostra a situação de um vôo parcial, o qual está limitado à circunferência que representa a maior distância possível de se atingir em um estagio de vôo.

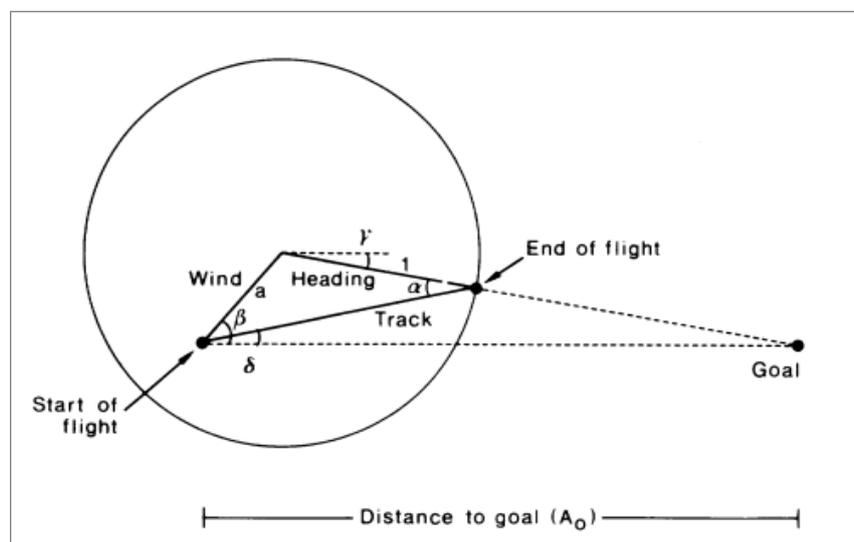


Figura 4.2 – Modelo da velocidade vetorial da ave com o vetor vento [ALERSTAM 1979].

### 4.1.3 Estratégia para minimizar o gasto de energia em função do vento lateral e de um objetivo fixo

A contribuição basilar da pesquisa de LIECHTI [LIECHTI 1995], que propõe e demonstra pela primeira vez o ajuste simultâneo da posição e velocidade de voo do pássaro *Sylvia borins*, foi a unificação dos resultados de [ALERSTAM 1979, PENNYCUICK 1982] através de uma luminosa manipulação matemática. Um resultado significativo desse trabalho está fundamentado na idéia de que supondo que uma ave deseje minimizar a distância restante até o objetivo fixo em um determinado estágio de voo (com ventos constantes) a velocidade também tem que ser ajustada para compensar o deslocamento originado pelo vento.

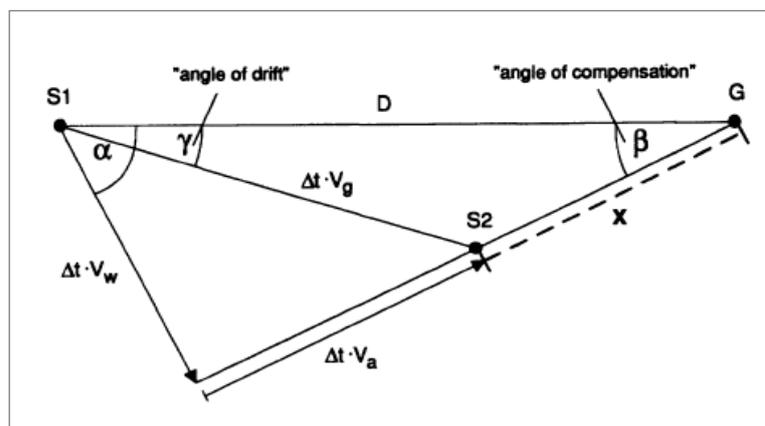


Figura 4.3 – Modelo geométrico representando a influência do vento [LIECTHI, 1995].

Na figura 4.3 o vento tem a velocidade  $V_w$  na jornada migratória de uma ave com velocidade  $V_a$  e distante  $D$  unidades de seu objetivo  $G$ . A distância restante é  $X$ , após uma etapa de vôo e  $V_g$  é a velocidade da ave em relação ao solo

A distância percorrida durante este estágio de vôo é o produto do tempo de vôo  $\Delta t$  pela velocidade em relação ao solo ( $V_g$ ). O gasto energético  $dE$  da ave em função de  $\Delta t$  é mostrado na equação 4.2, onde  $P$  é a potência da ave

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (4.2)$$

Substituindo-se a equação 4.1 na equação 4.2 podemos expressar a energia  $E$  em função da velocidade da ave no ar  $V_a$ , mostrada na equação 4.3.

$$E(V_a) = \int P(V_a) dt \quad (4.3)$$

A distância restante  $X$ , após um estágio de vôo, é calculada pela equação 4.4, obtida a partir da lei dos cossenos aplicada ao triângulo da figura 4.3

$$X = [(V_w \Delta t)^2 + (D)^2 - 2\Delta t V_w D \cos \alpha]^{1/2} - V_a \Delta t \quad (4.4)$$

onde  $dX/dV_a = 0$  no ponto  $V_a$ , o que minimiza a distância restante.

Essa equação também pode ser expressa em função da energia e da velocidade da ave  $X(E, V_a)$ , quando inserida a equação 4.2 no lugar de  $dt$  na equação 4.4. A equação diferencial total  $dX/dV_a$  pode então ser representada como:

$$dX = \left( \frac{\partial X}{\partial V_a} \right) dV_a + \left( \frac{\partial X}{\partial E} \right) dE \quad (4.5)$$

onde podemos dividir tudo por  $dV_a$

$$\frac{dX}{dV_a} = \left( \frac{\partial X}{\partial V_a} \right) + \left( \frac{\partial X}{\partial E} \right) \frac{dE}{dV_a} \quad (4.6)$$

Considerando que queremos minimizar o gasto energético em função da velocidade temos que  $dE/dV_a = 0$ , resultando em:

$$\frac{dX}{dV_a} = \frac{\partial X}{\partial V_a} \quad (4.7)$$

que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{dX}{dV_a} = X' \quad (4.8)$$

o que decorre:

$$\frac{dX'}{dV_a} = X'' \quad (4.9)$$

se isolarmos  $dV_a$  na equação 4.8 e 4.9 obtemos:

$$\frac{dX}{X'} = \frac{dX'}{X''} \quad (4.10)$$

que pode ser posto na forma:

$$\frac{dX}{dX'} = \frac{X'}{X''} \quad (4.11)$$

onde  $dX'$  representa  $dt$  e  $X$  é a distância restante:

$$dV_a = -\frac{X'}{X''} \quad (4.12)$$

Desta forma, podemos finalmente escrever a equação 4.13, o ajuste ótimo da direção e velocidade no vôo da ave, minimizando o gasto energético em função da distância restante com a equação diferencial.

$$V_{an+1} = V_{an} - \frac{X'}{X''} \quad (4.13)$$

## 4.2 Proposta de uma Lagrangeana para um vôo com vento lateral e objetivo fixo

Podemos escrever o vínculo estabelecido por LIECHTI [LIECHTI 1995], e esboçado pela figura 4.4, em termos das coordenadas generalizadas  $d'$  e  $X$  (equação 4.14) que representam respectivamente a nova distância devido à influência do vento e a distância restante após uma etapa de vôo.

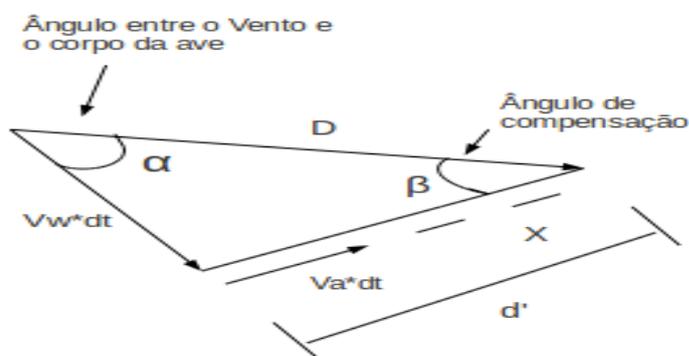


Figura 4.4 - Coordenadas generalizadas  $d'$  e  $X$  vinculadas ao objetivo fixo e à força do vento lateral.

$$V_a dt + X - d' = 0 \quad (4.14)$$

A energia cinética  $T$  em relação ao eixo migratório  $D$  pode ser descrita em termos das coordenadas cartesianas:

$$T = \frac{m}{2} [(x_g)^2 + (y_g)^2] \quad (4.15)$$

desde que:

$$\dot{x}_g = (\dot{x}_a + \dot{x}_w) = V_a \cos \beta + V_w \cos \alpha \quad (4.16)$$

$$\dot{y}_g = (\dot{y}_a + \dot{y}_w) = V_a \sin \beta - V_w \sin \alpha \quad (4.17)$$

onde  $V_a$  é o modulo da velocidade da ave no ar e  $V_w$  é o modulo da velocidade do vento.

Podemos recorrer ao potencial dissipativo definido RAYLEIGH expresso em termos da velocidade da ave no ar  $V_a$ , como mostramos na figura 4.5.

$$F_a = \frac{k}{2} V_a^2 \quad (4.18)$$

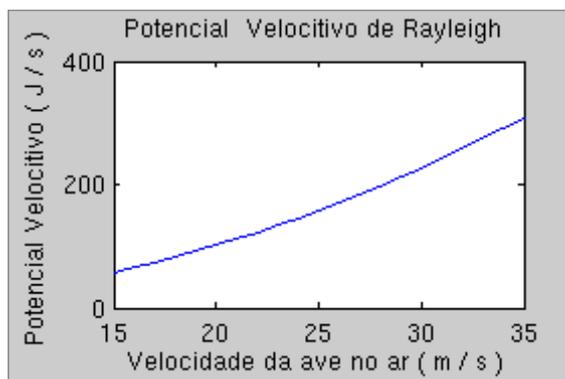


Figura 4.5 - Potencial dependente da velocidade quadrática,  $k = 0.5$ .

$$\dot{x}_g = (\dot{d}' - \dot{X}) \cos \beta + V_w \cos \alpha \quad (4.19)$$

$$\dot{y}_g = (\dot{d}' - \dot{X}) \sin \beta - V_w \sin \alpha \quad (4.20)$$

Os termos quadráticos da energia cinética resultam em:

$$\dot{x}_g^2 + \dot{y}_g^2 = (\dot{d}' - \dot{X})^2 + 2(\dot{d}' - \dot{X})\cos(\alpha + \beta) \quad (4.21)$$

por fim podemos propor a lagrangeana  $L = T - V$ :

$$L = \frac{m}{2}(\dot{d}' - \dot{X})^2 + m(\dot{d}' - \dot{X})\cos(\alpha + \beta) + \frac{k}{2}(\dot{d}' - \dot{X})^2 \quad (4.22)$$

como mostra figura 4.4,  $V_a dt + X = d'$ . Assim podemos reescrever a lagrangeana em termos da velocidade da ave  $V_a$ :

$$L = \frac{m}{2}(V_a)^2 + m(V_a)\cos(\alpha + \beta) + \frac{k}{2}(V_a)^2 \quad (4.23)$$

O ajuste na velocidade da ave no ar pode ser obtido de forma similar como mostra a equação 4.24.

$$V_{an+1} = V_{an} - \frac{L}{L'} \quad (4.24)$$

### 4.3 Simulador e adequação nebulosa

Um modelo nebuloso geralmente é composto de três etapas: *nebulização*, *inferência de regras* e *desnebulização*. O modelo aqui proposto nebuliza a direção

coplanar do vento (entrada) entre os conjuntos nebulosos *headwind*, *crosswind* e *tailwind*. As regras inferidas neste modelo estão fundamentadas na literatura concernente, notadamente na de biologia e, particularmente, na concernida pelo tema *Compensação da Deriva do Vento por Aves em Migração*. Na terceira etapa foi utilizado o método centróide para desnebulizar a saída do modelo. O modelo nebuloso aqui proposto e utilizado por nosso simulador está representado pela figura 4.6, cuja entrada é a direção coplanar do vento aplicada ao corpo da ave em migração e a desnebulização possui duas saídas: *velocidade* e *ângulo*. As três regras nebulosas são inferidas e processadas em um arquivo chamado *Badas.fis*.

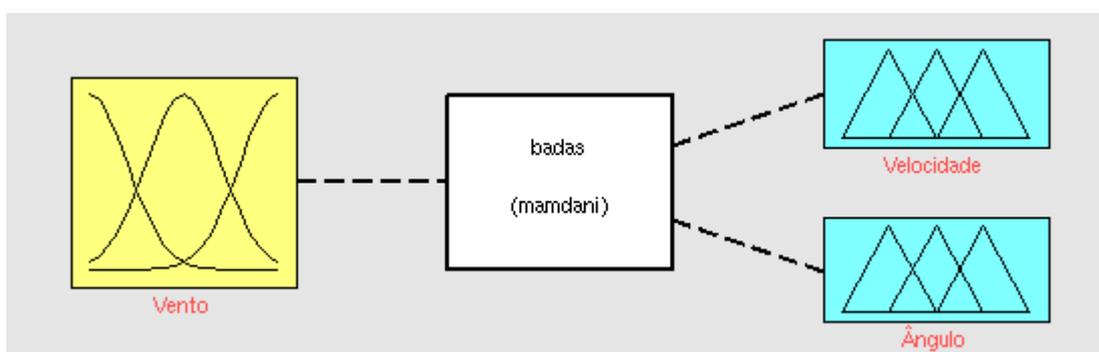


Figura 4.6- Nebulização da entrada. (esquema do modelo nebuloso).

### 4.3.1 Nebulização

Os conjuntos nebulosos podem receber vários “formatos” que devem ser estabelecidos por especialistas e/ou inseridos via ferramentas artificiais. Redes neurais artificiais são, por exemplo, uma ferramenta artificial bem apropriada para isso. Nosso modelo utiliza os conjuntos apresentados abaixo para nebulizar a entrada.

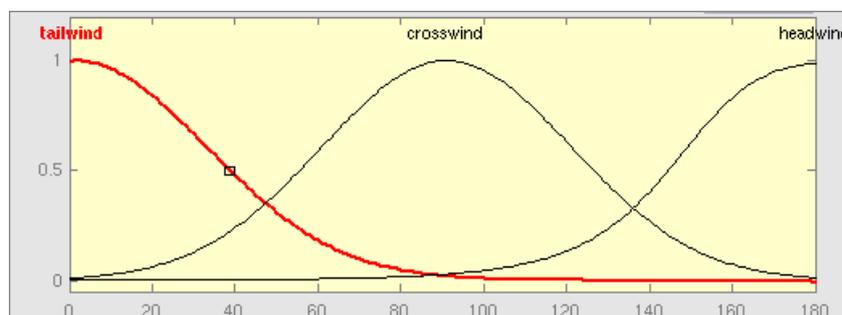


Figura 4.7 – Conjuntos nebulosos para a direção coplanar do vento em relação ao corpo da ave.

### 4.3.2 Inferência de regras

A segunda etapa consiste em inferir regras. Foram utilizadas observações linguísticas com respeito às dependências dos conjuntos entre si, como por exemplo, a compensação completa de *crosswind*, o aumento da velocidade diante *headwind* e a diminuição da velocidade com *tailwind* [ALERSTAM 1979, LIECHTI 1995], [PENNYCUICK 2008]. Estas observações foram representadas pelas três regras nebulosas mostradas abaixo, cujos processamentos são realizados através de composições nebulosas similares às explicitadas por ZADEH [ZADEH 1965]

- I. se *wide\_side* é *tailwind* então *velocidade pouca* e *beta pouca*
- II. se *wide\_side* é *headwind* então *velocidade média* e *beta pouco*
- III. se *wide\_side* é *crosswind* então *velocidade muita* e *beta muito*

### 4.3.3 Desnebulização

Na terceira etapa foi utilizado o método centróide para desnebulizar a saída do modelo conforme mostra a figura 4.8.

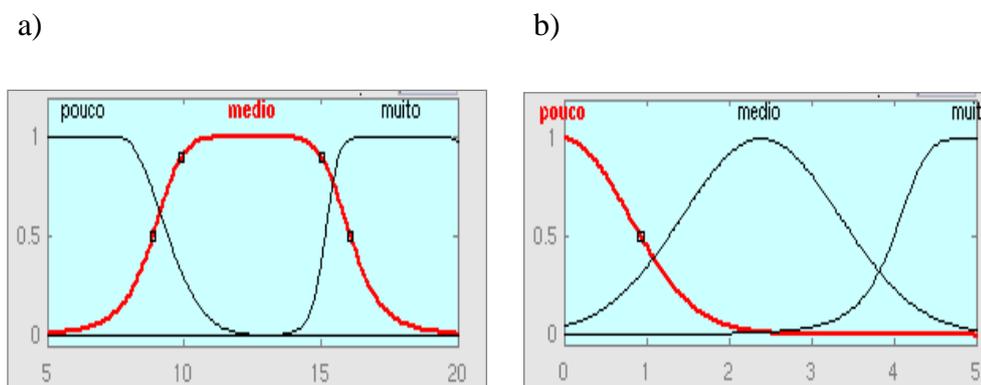


Figura 4.8 – Conjuntos nebulosos para as saídas: (a) velocidade da ave; (b) ângulo de compensação da deriva.

O esquema mostrado na figura 4.9 utiliza a saída desnebulizada para realizar o ajuste da direção da ave no ar, sendo que o eixo migratório representa a direção da ave na ausência de ventos.

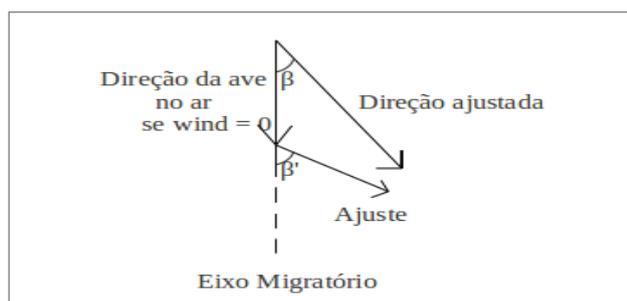


Figura 4.9 – Modelo de compensação da deriva do vento ao longo de um eixo migratório.

Na figura 4.9 a direção da ave no ar coincide com o eixo migratório em ventos calmos,  $\beta'$  representa a direção do ajuste fornecido pelo modelo nebuloso em relação ao eixo migratório e  $\beta$  representa o novo ângulo de direção da ave em relação a compensação de ventos *OESTE*, onde  $0^\circ \leq (\beta', \beta) \leq 15^\circ$ .

## 5 – SIMULAÇÕES E EXPERIMENTAÇÕES

Para reproduzir os modelos descritos no capítulo anterior utilizamos o ambiente Freelab<sup>2</sup> devido a sua conhecida eficiência em realizar simulações de modelos computacionais e também porque ele contém ótimos *toolboxes*, inclusive para trabalhar com sistemas nebulosos. Fizemos as respectivas implementações de todos os três modelos descritos no capítulo 4. Para as operações contidas nas equações lançamos mão dos recursos matemáticos/computacionais contidos nos *toobloxs* do Freelab. Em seguida implementamos o experimento de KARLSSON [KARLSSON 2010] a fim de reproduzir os ambientes artificiais necessários para estes modelos.

A fim de demonstrar a correlação entre os diversos dados utilizados nas simulações fizemos uma correlação circular [BATSCHELET 1981] e utilizamos o pacote estatístico SPSS<sup>3</sup> para podermos demonstrar a significância estatística da amostra empírica que foi utilizada na validação destes modelos. Por fim realizamos uma regressão linear entre as medidas simuladas e as medidas observadas.

### 5-1 Comparação entre os modelos

Na comparação dos três modelos descritos na secção 4, foram analisadas as mesmas dependências entre as variáveis analisadas em [LIECHTI 1995]. Escolhemos como variáveis dependentes a velocidade da ave no ar  $V_{an+1}$  e a direção da ave no ar  $\beta$ , e como variável independente a direção coplanar do vento  $\alpha$  (equação 4.13 e figura 4.3) de

---

2 (<http://freemat.sourceforge.net/>)

3 (<http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/products/statistics/>)

tal forma que essa direção variasse entre  $0^\circ$  (ventos a favor) e  $180^\circ$  (ventos contra). Foi atribuída a mesma origem e foi atribuído o mesmo objetivo fixo para todos os modelos simulados. A figura 5.4 mostra a comparação entre esses três modelos.

Uma análise particular foi realizada para os modelos das secções 4.1 e 4.2; para as implementações das equações 4.4 e 4.23 foram fornecidas três entradas diferentes para a constante  $V_w$  do módulo da velocidade do vento ( $V_{w1} = 25$  m/s,  $V_{w2} = 15$  m/s e  $V_{w3} = 10$  m/s) e também um valor para constante velocidade instantânea da ave no ar ( $V_{an} = 25$  m/s). As diferentes curvas obtidas são esboçadas nas figuras 5.1 e 5.2 de tal forma que o valor do módulo da velocidade instantânea da ave seja mantido constante para os três diferentes valores do módulo da velocidade do vento. É importante sublinhar que aqui o simulador nebuloso não considera a morfologia da ave (como acontece com o simulador de PENNYCUICK). O ajuste realizado é totalmente dependente das três regras inferidas no modelo.

### 5.1.1 A Equação de LIECHTI

Para reproduzir a equação diferencial proposta por LIECHTI foi necessário atribuir as características morfológicas da ave em migração com base nas características expostas pelo trabalho de PENNYCUICK [PENNYCUICK 2008] a fim de calcular as constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

### 5.1.2 A Equação de LAGRANGE

Na implementação da lagrangeana, foi atribuído na equação 4.23 o valor de  $6g$  para a massa de uma ave *Apus apus*. A equação de LIECHTI foi então utilizada para parametrizar a constante  $k$  encontrada no termo referente ao potencial generalizado (*potencial dissipativo* de RAYLEIGH).

### 5.1.3 O Modelo nebuloso

Na implementação do modelo nebuloso (descrito na secção 4.3), representado na figura 4.6, foi utilizada como entrada a direção coplanar do vento com o corpo da ave  $\alpha$ , e como saídas, o ajuste de direção da ave no ar  $\beta'$ , representado na figura 4.9, e um valor para nova velocidade da ave no ar  $V_{an+1}$ .

## 5.2 Simulações da compensação da deriva

A idéia geral foi a de reproduzir num ambiente artificial as condições encontradas por um bando de 150 aves da espécie *Apus apus* numa jornada migratória real ocorrida durante a estação de outono do ano 2007, que estão descritas nos trabalhos de KARLSSON [KARLSSON 2010] e de HENNIGSSON [HENNINGSSON 2009]. Desta forma, foram simulados sistematicamente, para cada uma das 150 aves artificiais pertencentes ao bando, 60 segundos de vôo sob a influência de uma força lateral aplicada pelo vento virtual com direção e módulo constante. Utilizamos uma recursão num arquivo de extensão *.m* para reproduzir cada 60 segundos de vôo e processar os modelos descrito no capítulo 4.

Nas implementações das equações 4.4 e 4.23 atribuímos valores para as constantes *módulo da velocidade instantânea da ave no ar* ( $V_{an} = 9.2$  m/s) e *módulo da velocidade do vento* ( $V_w = 7.6$  m/s). Esses valores de  $V_{an}$  e  $V_w$  advêm de cálculos sobre uma média computada para os valores empíricos reais encontrado para as 150 aves do bando real de *Apus apus* publicados nos trabalhos de HENNIGSSON [HENNINGSSON 2009]. Após cada 60 segundos de simulação foi medido o *track direction*  $T$  (vetor rastreamento em relação ao solo virtual) e, em seguida, foi calculado o *heading direction*

$H$  (vetor direção de vôo no ar virtual) que nada mais é do que o resultado da subtração do vetor *track direction* e do vetor *wind direction*  $W$  (vetor deslocamento devido ao vento virtual). Na comparação dos três modelos simulados para o bando de 150 aves *Apus apus* foram realizadas regressões lineares para cada modelo (figura 5.5. e tabela 5.10).

### 5.2.1 Parâmetro de compensação

Os problemas estatísticos encontrados para estimar a influência do vento lateral em vôos migratórios estão bem discutidos no trabalho de GREEN (GREEN, 2002) que estima mais qualitativamente do que quantitativamente a deriva do vento a partir da divisão dos ventos em duas classes distintas: ventos *LESTE* e ventos *OESTE*.

$$b_{track} = \frac{(T_1 - T_2)}{(\alpha_1 - \alpha_2)} \quad (5.1)$$

onde

$$\alpha = T_i - H_i \quad (5.2)$$

onde  $i = 1$  representa somente as medidas de  $T$  obtidas a partir dos ventos vindos da esquerda (ventos *OESTE*). Os respectivos valores de  $H$  ( $H = T - W$ ) também são referentes a ventos vindos da esquerda e  $i = 2$  representa as medidas  $T$  e cálculo de  $H$  a partir de ventos vindos da direita (ventos *LESTE*).

### 5.3 Amostras empíricas para compensação da deriva do vento lateral

O simulador aqui proposto utiliza as medidas da estação de outono, publicadas em (KARLSSON, 2010), dado que este conjunto de dados apresenta uma variação global da direção do vento, mostrando-se estatisticamente confiante para analisar qualitativamente a compensação da deriva, conforme explicitado por GREEN [GREEN 2002]. Isso não acontece com as medidas obtidas na estação da primavera, pois estas não possuem uma variação global da direção do vento o que acarreta numa insignificância estatística para a análise da compensação da deriva. Estas significâncias estatísticas que usamos nessa dissertação estão bem fundamentadas e validadas no trabalho de KARLSSON [KARLSSON 2010].

#### 5.3.1 Correlação circular

Como esta dissertação propõe um modelo para a previsão da direção da ave em função da direção do vento, realizamos uma correlação entre as medidas apresentadas nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3. Devido à natureza circular das medidas nós recorremos à estatística apropriada de BATSCHELET [BATSCHELET 1981], na qual a média circular  $\Psi$  para um conjunto de  $n$  medidas  $\varphi_n$  é dependente da média (representada nas equações, 5.4 e 5.5). As quantidades  $r$  e  $R$  indicam a existência de dispersão na amostra.

$$\Psi = f(\bar{Y}_m + \bar{X}_m) \quad (5.3)$$

$$\bar{X}_m = \frac{1}{n}(\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2 + \dots + \cos \varphi_n) \quad (5.4)$$

$$\bar{Y}_m = \frac{1}{n}(\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 + \dots + \sin \varphi_n) \quad (5.5)$$

$$r = [X^2 + Y^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5.6)$$

$$R = \left[ \left( \sum_i x_i \right)^2 + \left( \sum_i y_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.7)$$

Assim, a correlação circular pode ser representada pelas relações 5.8 e 5.9:

$$\delta_i = \psi_i + \varphi_i \quad (5.8)$$

$$r = \frac{1}{n} \left[ \left( \sum_i \delta_i \right)^2 + \left( \sum_i \delta_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.9)$$

### 5.3.2 Correlação linear e previsão

Como a amostra está concentrada em torno da média e temos uma variação global da direção do vento podemos então realizar os testes da estatística linear com o teste de RAYLEIGH e o *T-Student* [FISHER 1987]. Assim sendo, foi utilizado o pacote estatístico SPSS na análise da correlação dos dados aqui tratados. Em seguida, criamos um modelo de regressão bi-variável para prever a direção de vôo da ave no ar  $H$  em função da direção lateral do vento  $W$  e a direção de rastreamento em relação ao solo  $T$ . Primeiramente foi utilizada a amostra total nesta análise estatística, depois a amostra foi separada em classes distintas de ventos (*OESTE* e *LESTE*).

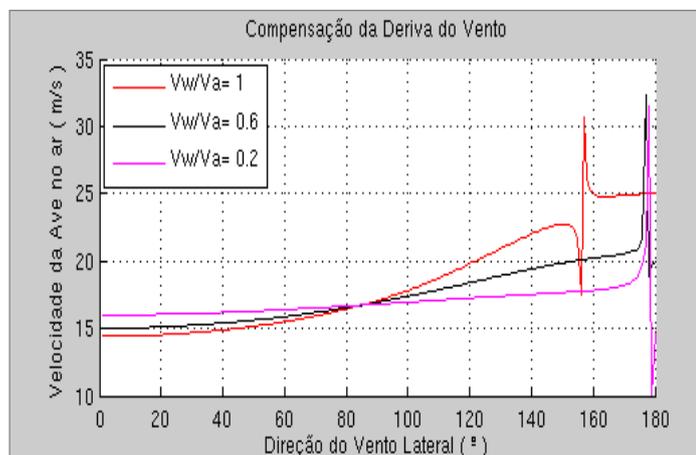
## 5.4 Resultados

Conforme mostram as figuras abaixo foram escolhidos o ângulo de compensação  $\beta$  e a velocidade da ave no ar  $V_a$  como variáveis dependentes da direção do vento. Primeiramente, mostramos o resultado comparativo das simulações dos três modelos descritos no capítulo 4. Em seguida, esboçamos a correlação entre os dados utilizados por esta dissertação, sendo que foi correlacionada primeiramente a amostra total e posteriormente foi feita a correlação para as duas classes distintas de ventos. Foi em seguida elaborado um modelo de previsão para a direção da ave em função do vento. Por fim, e para validar os nossos experimentos simulados, fizemos uma análise de regressão linear entre as medidas obtidas e as medidas empíricas conhecidas, conforme mostra a figura-5.5.

### 5.4.1 Implementação da equação de LIECHTI

Para inserir os valores referentes à morfologia da ave *Apus apus* (ou seja, para atribuir as constantes da equação 4.1) utilizamos as deduções contidas no trabalho de PENNYCUICK [PENNYCUICK 2008], atribuindo assim os respectivos valores para as constantes  $a = 1.9$ ,  $b = 0.012$  e  $c = 0.015$ . Como descrito em 5.1, devido à necessidade de uma comparação com os valores empíricos, o módulo da velocidade da ave no ar foi mantido invariante ( $V_{an} = 25$  m/s) e a para o módulo da velocidade do vento  $V_w$  foram atribuídos três valores diferentes,  $V_{w1} = 25$  m/s,  $V_{w2} = 15$  m/s,  $V_{w3} = 10$  m/s.

## a) Velocidade da ave



## b) Ângulo de Compensação

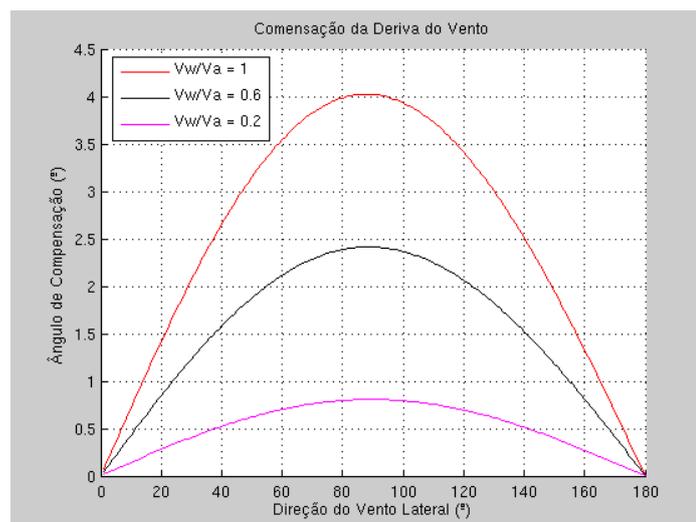


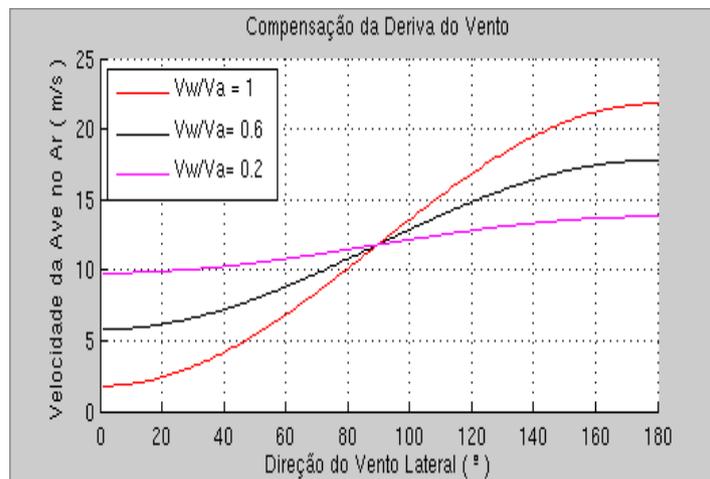
Figura 5.1– Dependência da velocidade (a) e direção (b) em função da direção coplanar do vento.

Na figura 5.1 cada linha representa uma intensidade diferente para o módulo da velocidade do vento: linha vermelha  $V_w = 25$  m/s, linha preta  $V_w = 15$  m/s, linha lilás  $V_w = 5$  m/s. A velocidade da ave é mantida constante ( $V_a = 25$  m/s) para as três linhas.

## 5.4.2 Implementação da equação de LAGRANGE

Para a constante  $k$  encontrada no potencial dissipativo (equação 4.18) atribuímos o valor  $k = 0.5$  após realizarmos uma parametrização com a equação 4.1. De forma similar ao exposto em 5.4.1 a velocidade inicial da ave foi mantida invariante ( $V_a = 25$  m/s). Para a velocidade do vento foram atribuídos três valores diferentes  $V_{w1} = 25$  m/s ,  $V_{w2} = 15$  m/s,  $V_{w3} = 5$  m /s.

### a) Velocidade da ave



### b) Ângulo de Compensação

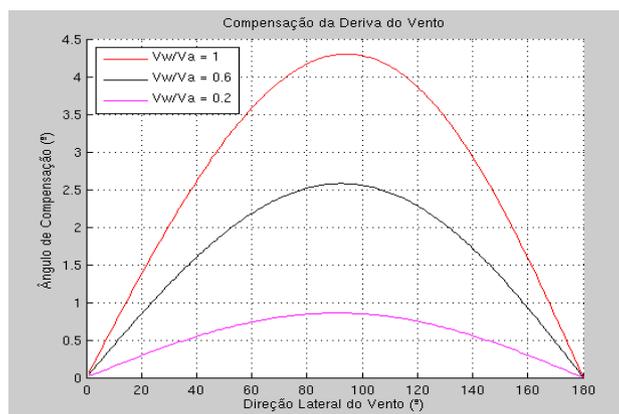


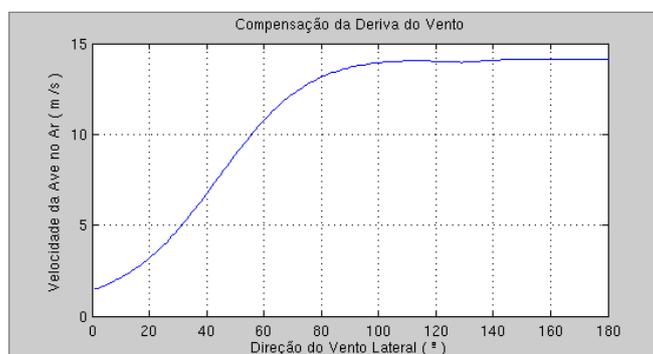
Figura 5.2 – Dependência da velocidade e direção em função da direção coplanar do vento.

Na figura 5.2 cada linha representa uma intensidade da velocidade do vento: linha vermelha  $V_w = 25$  m/s, linha preta  $V_w = 15$  m/s e linha lilás  $V_w = 5$  m/s. A velocidade da ave é mantida constante ( $V_a = 25$  m/s) para as três linhas.

### 5.4.3 Implementação do modelo Nebuloso

Na simulação com o modelo nebuloso foram atribuídos ao universo dos conjuntos nebulosos valores compatíveis com os vistos na literatura concernente. Como explicitamos em 5.1, o modelo nebuloso não considera, neste caso, o módulo da velocidade do vento  $V_w$  e da velocidade instantânea da ave no ar  $V_{an}$ .

#### a) Velocidade da ave



#### b) Ângulo de Compensação

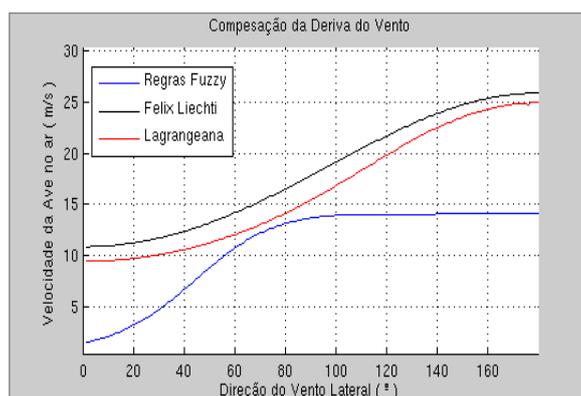


Figura 5.3– Dependência da velocidade e direção em função da direção coplanar do vento

#### 5.4.4 Comparação entre os modelos

Para comparar de forma homogênea os três modelos descritos no capítulo 4 nós atribuímos, nas equações 4.4 e 4.23, as mesmas velocidades para a o módulo da velocidade do vento  $V_w = 25$  m/s, e para o módulo da velocidade instantânea da ave  $V_{an} = 25$  m/s.

##### a) Velocidade da ave



##### b) Ângulo de Compensação

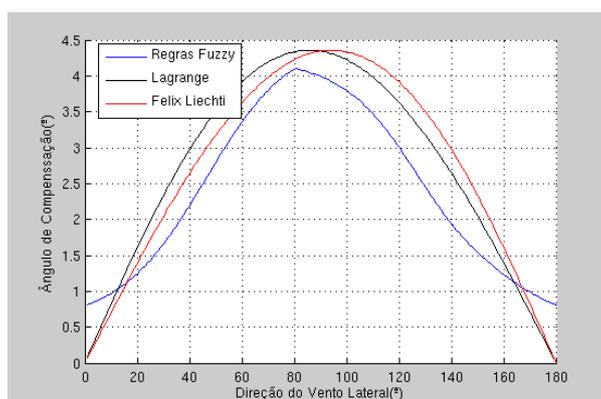


Figura 5.4 – Simulações para a direção (ângulo de compensação (a) e velocidade (b)) da ave em função da direção do vento.

Na figura 5.4 os valores correspondem às simulações dos três modelos: a linha vermelha representa o modelo de LIECHTI; a linha preta representa o modelo de Lagrange; a linha azul representa o nosso modelo nebuloso.

### 5.4.5 Testes estatísticos

Mostramos aqui os resultados da inserção das medidas empíricas no SPSS, que demonstram a correlação das medidas utilizadas nesta dissertação. Foi realizada a correlação de três maneiras distintas, contudo sempre foi utilizada a amostra coletada na estação de outono. Primeiro utilizamos a amostra contendo todos os ventos ( $N = 150$ ) e em seguida foram utilizados os ventos deparados nas duas classes distintas (ventos *LESTE* e ventos *OESTE*, conforme descrito em 5.3).

Tabela 5.1- Correlação entre as médias Wind e Track e os cálculos Heading, para amostra contendo todos os ventos de outono.

Correlations				
		Heading	Track	Wind
<b>Heading</b>	<b>Pearson Correlation</b>	1	,328(**)	,247(**)
	<b>Sig. (2-tailed)</b>		,000	,002
	<b>N</b>	150	150	150
<b>Track</b>	<b>Pearson Correlation</b>	,328(**)	1	,302(**)
	<b>Sig. (2-tailed)</b>	,000		,000
	<b>N</b>	150	150	150
<b>Wind</b>	<b>Pearson Correlation</b>	,247(**)	,302(**)	1
	<b>Sig. (2-tailed)</b>	,002	,000	
	<b>N</b>	150	150	150

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

De acordo com os resultados apresentados na tabela 5.1 pode-se verificar que existe uma correlação positiva entre a direção do vento (*Wind*) e a direção do vôo da ave no ar (*Heading*). Essas variáveis apresentam um coeficiente de correlação de Pearson positivo

e igual a 0.247 ( $r = 0.247$ ). Isto pode também ser verificado para a direção do vôo da ave no ar e a direção de rastreamento (*Track*) que apresentaram um coeficiente de correlação de Pearson igual a 0.328 ( $r = 0.328$ ). Os resultados apresentados na mesma tabela também sugerem que existe uma correlação positiva entre a direção do vento e a direção de rastreamento com o coeficiente de correlação de Pearson igual a 0.302 ( $r = 0.302$ ).

Tabela 5.2- Correlação entre as médias Wind e Track e os cálculos de Heading para as amostras contendo os ventos pertencentes à classe OESTE de outono.

Correlations				
		Heading	Track	Wind
Heading	<b>Pearson Correlation</b>	1	-,001	-,457(**)
	<b>Sig. (2-tailed)</b>		,993	,000
	<b>N</b>	55	55	55
Track	<b>Pearson Correlation</b>	-,001	1	-,291(*)
	<b>Sig. (2-tailed)</b>	,993		,031
	<b>N</b>	55	55	55
Wind	<b>Pearson Correlation</b>	-,457(**)	-,291(*)	1
	<b>Sig. (2-tailed)</b>	,000	,031	
	<b>N</b>	55	55	55
** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).				
* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).				

De acordo com os resultados apresentados na tabela 5.2 pode-se verificar que existe correlação negativa entre a direção do vento e a direção do vôo da ave no ar. Essas variáveis apresentam um coeficiente de correlação de Pearson positivo e igual a -0.457 ( $r = -0.457$ ). Isto pode ser verificado também com a direção do vôo da ave no ar e a direção de rastreamento, que apresentaram um coeficiente de correlação de Pearson igual a -0.01 ( $r = -0.01$ ). Os resultados apresentados na mesma tabela, também sugerem que existe uma correlação negativa entre a direção do vento e a direção de rastreamento com o coeficiente de correlação de Pearson igual a -0.291 ( $r = -0.291$ ).

Tabela 5.3- Correlação entre as médias Wind e Track e os cálculos Heading para amostras contendo os ventos pertencentes à classe LESTE de outono.

Correlations				
		Heading	Track	Wind
Heading	Pearson Correlation	1	,072	-,216(*)
	Sig. (2-tailed)		,489	,035
	N	95	95	95
Track	Pearson Correlation	,072	1	-,167
	Sig. (2-tailed)	,489		,107
	N	95	95	95
Wind	Pearson Correlation	-,216(*)	-,167	1
	Sig. (2-tailed)	,035	,107	
	N	95	95	95
* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).				

De acordo com os resultados apresentados na tabela 5.3 pode-se verificar que existe correlação negativa entre a direção do vento e a direção do vôo da ave no ar. Essas variáveis apresentam um coeficiente de correlação de Pearson positivo e igual a -0.216 ( $r = -0.216$ ). Isto também pode ser verificado com a direção do vôo da ave no ar e a direção de rastreamento que apresentaram um coeficiente de correlação de Pearson igual a 0.072 ( $r = 0.072$ ). Os resultados apresentados na mesma tabela, também sugerem que existe uma correlação negativa entre a direção do vento e a direção de rastreamento com o coeficiente de correlação de Pearson igual a -0,167 ( $r = -0.167$ ).

## 5.4.6 Modelos de previsão estatística

### 5.4.6.1 Variável dependente $T$ e variável independente $W - T(W)$

Como o rastreamento é uma “medida” que está diretamente relacionada à direção do vento elaboramos um modelo de previsão para esta variável em particular, como mostram as tabelas 5.4, 5.5 e 5.6

Tabela 5.4- Regressão linear entre as médias Wind e Track para amostra contendo todos os ventos de outono.

Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	89,807	14,766		6,082	,000
	Wind	,236	,061	,302	3,847	,000
a Dependent Variable: Track						

A tabela 5.4 é o resultado de um modelo de previsão estatística onde a direção de rastreamento da ave pode ser prevista em função da direção do vento lateral (de acordo com os coeficientes obtidos a partir de uma regressão linear).

Tabela 5.5- Regressão Linear entre as médias Wind e Track para amostra pertencente à classe dos ventos OESTE para o outono.

Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	289,409	39,862		7,260	,000
	Wind	-,301	,136	-,291	-2,215	,031
a Dependent Variable: Track						

A tabela 5.5 é o resultado de um modelo de previsão estatística onde a direção de rastreamento da ave para ventos *OESTE* pode ser prevista em função da direção do vento lateral (de acordo com os coeficientes obtidos a partir de uma regressão linear).

Tabela 5.6- Regressão linear entre as médias Wind e Track para amostra pertencente à classe dos ventos *LESTE* para o outono.

Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	224,071	21,726		10,314	,000
	Wind	-,305	,187	-,167	-1,629	,107

a Dependent Variable: Track

A tabela 5.6 é o resultado de um modelo de previsão estatística onde a direção de rastreamento da ave para ventos *LESTE* pode ser prevista em função da direção do vento lateral (de acordo com os coeficientes obtidos a partir de uma regressão linear).

#### 5.4.6.2 Variável dependente *He* e variáveis independentes *W* e *T* - $H(W, T)$

Como o rastreamento é uma medida que está diretamente relacionada com a direção do vento nós elaboramos um modelo de previsão para esta variável em particular. Como mostrado nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9

Tabela 5.7- Regressão linear entre as médias Wind, Track e Heading para amostra contendo todos os ventos de outono.

		Coefficients(a)				
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	116,160	14,538		7,990	,000
	Wind	,115	,057	,163	2,026	,045
	Track	,250	,072	,279	3,458	,001
a Dependent Variable: Heading						

A tabela 5.7 é o resultado de um modelo de previsão estatística onde a direção de vôo da ave no ar pode ser prevista em função da direção do vento lateral e a direção de rastreamento (de acordo com os coeficientes obtidos a partir de uma regressão linear).

Tabela 5.8- Regressão linear entre as médias Wind , Track e Heading para amostra pertencente à classe dos ventos OESTE para o outono.

		Coefficients(a)				
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	419,067	58,362		7,180	,000
	Wind	-,577	,147	-,499	-3,919	,000
	Track	-,164	,142	-,146	-1,150	,256
a Dependent Variable: Heading						

A tabela 5.8 é o resultado de um modelo de previsão estatística onde a direção de vôo da ave no ar para ventos *OESTE* pode ser prevista em função da direção do vento lateral e direção de rastreamento (de acordo com os coeficientes obtidos a partir de uma regressão linear).

Tabela 5.9- Regressão linear entre as médias Wind , Track e Heading para amostra pertencente à classe dos ventos LESTE para o outono.

Coefficients(a)						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	173,604	17,546		9,894	,000
	Wind	-,213	,105	-,210	-2,037	,045
	Track	,020	,057	,037	,358	,721

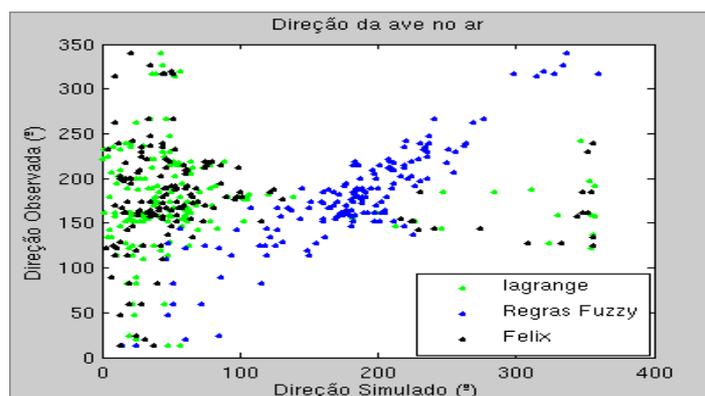
a Dependent Variable: Heading

A tabela 5.9 é o resultado de um modelo de previsão estatística onde a direção de vôo da ave no ar para vento *LESTE* pode ser prevista em função da direção do vento lateral e direção de rastreamento (de acordo com os coeficientes obtidos a partir de uma regressão linear).

#### 5.4.7 Análise da regressão linear: medidas simuladas x medidas observadas.

Comparamos as medidas simuladas com as medidas encontradas na natureza, conforme descrevemos no que se segue

a) Direção da ave no ar



## b) Rastreamento da ave em relação ao solo

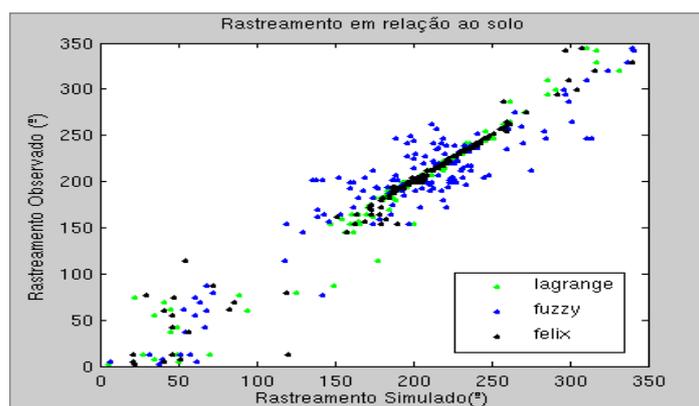


Figura 5.5 Regressão linear entre as medidas simuladas e as medidas encontradas na natureza para (a) direção da ave no ar e (b) para o rastreamento em relação ao solo.

Conforme mostra a figura 5.5, foram realizadas simulações com a equação de LIECHTI (pontos pretos), com as equações de movimento de LAGRANGE (pontos verdes), e com o nosso modelo nebuloso (pontos azuis). Os valores da regressão linear estão mostrados na tabela 5.10

Tabela 5.10 - Valores encontrados pela regressão linear.

	Fit Linear Track	Fit Linear Heading
Equação de Felix	$1,1 * X - 18$	$-0,033 * X + 1800$
Equação de Lagrange	$1,1 * X - 28$	$-0,0054 * x + 1800$
Modelo nebuloso	$0,93 * X + 11$	$0,83 * X + 2$

Para a tabela 5.10, para a simulação dos três modelos de compensação da deriva do vento (equação de LIECHTI, equação de LAGRANGE e nosso modelo nebuloso), nós

utilizamos o conjunto de dados fornecido por KARLSON e HENNINGSSON [HAKAN and HENNINGSSON 2010].

Tabela 5.11 - Medidas obtidas com a simulação do modelo nebuloso.

$B_{tra}=0,29$	W °	R	T °	r	H °	r	Airspeed	G.speed
Todos direções	110	0,25	219	0,86	211	0,95	9,5	9,7
OESTE/outono	291	0,66	226	0,93	193	0,97	8,9	11,3
Leste	111	0,78	179	0,94	223	0,97	9,8	8,5

Na tabela 5.11, estão apresentadas as medidas obtidas com a simulação como a compensação da deriva do vento para o outono, as médias de *track direction*, *heading direction*, *wind direction* e velocidade da ave no ar e em relação ao solo e, também, o parâmetro de compensação para jornada migratória de aves da espécie *Apodiforme Apus apus*.

## 6 – CONCLUSÕES

### 6.1 Algumas comparações entre os modelos

A equação diferencial de LIECHT é reconhecidamente não trivial. Ela é descontínua e fornece valores não-reais para velocidade da ave (no intervalo referente ao *headwind*, como mostrado pela figura 5.1-a). Essa equação pode ser resolvida com uma função recursiva, mas isso geralmente requer um custo computacional relativamente elevado. Por esta razão, advogamos que a lagrangeana (figura 5.2-a), ainda que possivelmente não absolutamente adequada, é mais adaptada para a nossa classe de problemas em questão do que a equação de LIECHT porque não requer uma recursão para ser implementada (embora possa ser também programada por uma solução recursiva). Ademais, a lagrangeana não apresenta problemas de descontinuidades e de valores irrealis. Com efeito, no formalismo de LAGRANGE as grandezas são escalares e são fundamentadas a partir dos conceitos da energia do sistema e das coordenadas generalizadas (evitando alguns empecilhos de natureza vetorial que são encontrados na mecânica newtoniana fundamentada a partir dos conceitos de força). Há de se notar que a dependência da distância restante ao objetivo fixo, encontrada na equação de LIECHT, está implícita na lagrangeana graças aos vínculos holônomos utilizados em sua elaboração (como observado na figura 5.5-a).

Já o modelo nebuloso proposto é fundamentado nas observações de biólogos e tem se mostrado robusto e eficiente em nossas simulações, o que nos autoriza a o utilizar como substituto às duas equações, minimizando os problemas de situações “indesejáveis” tal como a descontinuidade da equação de LIECTHI (figura 5.3). Ademais, no modelo

nebuloso é bastante simples inserir outros limites para o ajuste da velocidade a fim de corrigir a deriva do vento. Em outras palavras, o modelo nebuloso parece ser o mais flexível para as diversas (e complexas) situações encontradas no comportamento de uma ave real em vôo sazonal migratório.

## 6.2 Validação estatística das amostras

Devido à relatada não-significância estatística contida nas amostras coletadas durante a estação da primavera [KARLSSON 2010] escolhemos as amostras coletadas durante a estação de outono de 2007.

Primeiramente fizemos os testes de significância estatística sugerido em [BLASTECHALTER 1981]. Calculamos a correlação circular (equação 5.9) para toda a amostra ( $N = 150$ ) e para os dados separados em duas classes distintas: ventos *OESTE* ( $N = 55$ ) e ventos *LESTE* ( $N = 95$ ). Encontramos a correlação entre todas as variáveis envolvidas, ainda que as variáveis  $T$  e  $W$ , tanto para a amostra total como para a amostra pertencente à classe *OESTE*, estejam fracamente correlacionadas com os respectivos parâmetros de significância,  $r = 0.33$ ,  $r = 0.14$ . Contudo nós obtivemos uma significância alta para a correlação pertencente ao conjunto *LESTE*,  $r = 0.48$ . A baixa correlação entre  $W$  e  $T$  para os dados pertencentes à classe de ventos *OESTE* pode ser entendida graças ao ganho que a ave tem quando ela “percebe” que ventos nesta direção contribuem para sua migração e, por consequência, não requerem muitos ajustes.

Em seguida realizamos uma correlação linear utilizando o software SPSS e fizemos testes de significância estatística. De forma similar à correlação circular, escolhemos primeiro a amostra total ( $N = 150$ ), conforme mostra a tabela 5.1. Posteriormente utilizamos os dados separados em duas classes distintas (tabela 5.2 para

ventos *OESTE* e tabela 5.3 para ventos *LESTE*) ao analisar a significância estatística (mostrada em 6.2.1). Em seguida elaboramos um modelo de previsão estatística (descrito em 6.4.2).

### 6.2.1 Análise da correlação estatística para os dados utilizados

Para a validação dessas correlações observadas na tabela 5.1 aplicamos o *teste de hipóteses*, um teste específico de significância estatística. Em outras palavras, para verificar se essas correlações estão estatisticamente significativas, aplicamos os seguintes passos do teste de hipóteses:

#### Hipóteses

$H_0$ :  $\rho$  igual a 0

(Não existe correlação entre a direção do vento e a direção do vôo da ave)

$H_a$ :  $\rho$  diferente de 0

(Existe correlação entre a direção do vento e a direção do vôo da ave)

#### Nível de significância

O nível de significância adotado foi de 5%  $\alpha = 0.05$ . A significância de  $r$  é testada com o *T-Student* e calculado com  $n-2$  de grau de liberdade. Este cálculo foi realizado computacionalmente e o *Sig (P-valor)* é mostrado na tabelas 5.1, 5.2 e 5.3. O *Sig* representa a probabilidade mínima que leva à rejeição da hipótese em teste (*Hipótese Nula*), ou seja, é a força da evidência contra a hipótese nula. Quanto menor o *P-valor*, mais forte é a evidência contra a hipótese nula. Lembrando que para este primeiro teste temos como *hipótese nula* o fato de que não existe correlação entre a direção do vento e a direção do vôo da ave no ar. A nossa *hipótese alternativa* é o fato de que existe correlação

entre essas variáveis.

### Regra de decisão

Rejeita-se a hipótese nula se *Sig* for menor do que o nível de significância selecionado para o estudo (i.e., se  $Sig < \alpha$ ) ou se  $t_c < t_{crit; (n-2)\alpha}$ . Portanto, fazendo comparação do valor do *Sig* obtido (0.002, tabela 5.1) e o nível de significância usado para este estudo ( $\alpha = 0.05$ ) podemos constatar que  $Sig < \alpha$ . Por consequência direta, rejeita-se a correlação nula.

### Decisão ou conclusão

Portanto, de acordo com os resultados do teste (posto um nível de significância de 5%) há uma fortíssima evidência contra a hipótese nula. Em outras palavras, rejeita-se a hipótese de que a correlação entre a direção do vento e a direção do vôo da ave no ar é nula. Podemos assim concluir que as correlações observadas através dos coeficientes de correlação de Pearson são confiáveis. Executando similarmente os mesmos passos para todas as correlações analisadas anteriormente e fazendo a respectivas comparações das estatísticas e do nível de significância no passo 4 (portanto na regra de decisão) podemos verificar para tabela 5.1 temos:

Os valores de *Sig* para os pares de variáveis *direção do vôo da ave no ar* versus *direção do rastreamento*, e também *direção do vento* versus *direção do rastreamento* são iguais ( $Sig = 0.000$ ). Analisando valor (comparando-o com o  $\alpha = 0.05$ ) podemos obter a conclusão de que há **forte evidência** de rejeitar a hipótese nula. Em outras palavras, existe correlação entre a *direção do vôo da ave no ar* e a *direção do rastreamento*, assim como entre a *direção do vento* e a *direção do rastreamento*. Essas correlações são estatisticamente significativas e, portanto, verossímeis.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 5.1 podemos verificar que existe uma correlação positiva entre a direção do vento (*Wind*) e a direção do vôo da ave no ar (*Heading*). Com efeito, essas variáveis apresentam um coeficiente de correlação de Pearson positivo ( $r = 0.247$ ). Isto também é verdade para a direção do vôo da ave no ar e a direção de rastreamento (*Track*), pois apresentaram um coeficiente de correlação de Pearson também positivo ( $r = 0.328$ ). Os resultados dessa tabela também corroboram para uma correlação positiva entre a direção do vento e a direção de rastreamento com o coeficiente de correlação de Pearson positivo ( $r = 0.302$ ). Ainda que as correlações apresentadas na tabela 5.1 possam ser consideradas fracas elas asseguram, no entanto, a existência de correlação que indica que a direção do vento e a direção do vôo da ave no ar resultam numa direção de rastreamento de sentido positivo (sentido não contrário à do vento e da ave) e asseguram também que a direção do vento influencia na direção do vôo da ave no ar.

Ainda via a tabela 5.2 podemos extrair que as correlações com amostras contendo ventos pertencentes à classe *OESTE* de outono apresentam a seguinte característica: a direção do vento e a direção do vôo da ave no ar sugerem uma correlação negativa moderada ( $Sig = 0.000$ ). Neste caso, a correlação é existente, pois, há evidência muito forte contra a hipótese nula (a hipótese nula é de que não existe correlação entre a direção do vento e a direção do vôo da ave para amostras contendo os ventos pertencentes a classe *OESTE* de outono). Assim sendo, podemos afirmar que essa correlação é verossímil.

Quanto à correlação que apresentou sinal negativo ( $r = -0.457$ ), ela leva a uma constatação de que (para amostras dos ventos pertencentes a classe *OESTE* de outono) a direção do vôo da ave contraria a direção do vento. De acordo com a indicação do coeficiente de correlação de Pearson ( $r = -0.001$ ), a correlação entre a direção do vôo da ave e a direção do rastreamento é também negativa, porém, é muito fraca (quase inexistente). Esse fato é confirmado pelo  $Sig = 0.993$ , uma evidência claramente muito fraca contra a hipótese nula (i.e., não se rejeita a hipótese de que não existe correlação

entre a direção do vôo da ave e a direção do rastreamento) embora, na prática, se verifique a existência dessa correlação.

As direções do vento e as do rastreamento apresentaram um coeficiente de correlação  $r = -0.291$  com  $Sig = 0.031$ . Estes resultados nitidamente revelam que existe correlação entre essas variáveis e que a mesma é negativa fraca. Com o *teste de hipóteses* obedecendo similarmente aos passos apresentados na interpretação da tabela 5.1, chegamos à uma conclusão de que essa correlação realmente existe, pois  $Sig = 0.031$ . Há de salientar que esse resultado sobre a correlação indica que a direção do rastreamento tem sentido contrário em relação ao do vento.

Os resultados da tabela 5.3 sugerem que, para as correlações com amostras contendo os ventos pertencentes à classe *LESTE* de outono, o par de direções *vento* e *vôo da ave no ar* indicam que existe correlação negativa fraca ( $Sig = 0.035$ ). Este valor de *Sig* nos leva a concluir indubitavelmente que existe correlação entre essas variáveis dado que há forte evidência contra a hipótese inversa (de que não existe a correlação entre essas variáveis). De acordo com o coeficiente de correlação de Pearson ( $r = 0.072$ ) a correlação entre a *direção do vôo da ave* e a *direção do rastreamento* é positiva ainda que muito fraca.  $Sig = 0.489$  nos sugere uma evidência fraca contra a hipótese nula, ou seja, não se rejeita a hipótese de que não existe correlação entre a direção do vôo da ave e a direção do rastreamento, embora na prática se verifique a correlação. O mesmo fato de não rejeição da hipótese nula pode ser verificado no que concerne às direções do vento e a do rastreamento; elas apresentaram um coeficiente de correlação  $r = -0.167$ ) com  $Sig = 0.107$ . Estes resultados nos revelam que existe uma correlação entre essas variáveis e que a mesma é negativa fraca. Com o *teste de hipóteses* obedecendo aos passos apresentados na interpretação da tabela 5.1, pudemos chegar a uma conclusão de que essa correlação não existe (embora na prática se verifique a correlação).

### 6.3 Simulações dos modelos

Na correlação com as medidas empíricas (figura 5.5) podemos perceber que as duas equações e o modelo nebuloso proposto fornecem resultados satisfatórios nas simulações do rastreamento em relação ao solo (figura 5.5-b). Realizamos uma regressão linear para as duas equações diferenciais e para o modelo nebuloso (tabela 5.10) que consolidou o nosso resultado de forma adequada e satisfatória para o rastreamento da ave em evidência. No entanto, não podemos dizer o mesmo para o resultado da regressão linear para direção de vôo da ave no ar (figura 5.5-a).

O modelo nebuloso aqui proposto foi eficiente para aceitar (adicionar) novas observações “empíricas”, como no caso da independência da distância restante (KARLSON, 2010) para uma migração sazonal da *Apus apus*, como pode ser visto na figura 5.5-a. Já prevíamos que a equação de LIECTHI não seria hábil para reproduzir os dados empíricos de KARLSON, então não nos causou admiração que a lagrangeana também não reproduzisse os precisamente mesmos dados. Com efeito, as duas equações diferenciais estão nesse caso fundamentadas na mesma classe de variáveis.

A fim de confirmar uma correlação satisfatória com as amostras empíricas simulamos também o nosso modelo nebuloso sem considerar a distância restante ao objetivo fixo. Introduzimos uma compensação maior ( $5^\circ$ ) do que a permitida pelas equações (como ilustra a figura 5.1-a). Pragmaticamente o que fizemos foi utilizar um limite de  $10^\circ$  que foi inserido no domínio dos conjuntos nebulosos. Isto não viola o modelo e confirmou sua adequabilidade para esse problema.

Finalmente, para nos asseverarmos da adequabilidade e robustez do simulador com adequação nebulosa que propomos nessa dissertação, testamos ainda diferentes formas de conjuntos nebulosos. Após uma análise criteriosa e exaustiva dos resultados obtidos escolhemos os conjuntos com o formato gaussiano, pois eles foram os que forneceram uma curva mais próxima da parábola desejada (figura 5.3-b) e da sigmóide

(figura 5.3-a). Desta forma, o simulador com adequação nebulosa proposto se mostrou robusto e eficiente em predizer possibilidades no comportamento de uma ave *Apus apus* em migração noturna sazonal e se mostrou, adicionalmente, de singela utilização pois que permite facilmente inserções de novas informações/dados e releva alguns déficits característicos das equações habitualmente empregadas, contornando problemas geométricos encontrados nos modelos matemáticos comumente utilizados, como relatou GREEN [GREEN 2002].

## **7- DIFICULDADES ENCONTRADAS E TRABALHOS FUTUROS**

### **7.1 Motivações**

O interesse central do grupo de pesquisa ao qual o autor dessa dissertação está inserido (MASI-PPGI-UFRJ) aflui para a área de robótica. Dentro dessa área pesquisas vêm sendo feitas sobre confederações de robôs e comportamentos de sistemas autônomos, que, por consequência, têm sido também direcionadas a interesses sobre a biorrobótica e sistemas bio-inspirados. Por decorrência direta, o estudo de sistemas comportamentais biológicos tem sido extremamente instigado dentro do grupo MASI. As motivações principais da presente dissertação repousam essencialmente sobre essas características.

Desta forma, despertamos um veemente interesse em aplicar fundamentos biológicos para modelagem computacional, um tema que tem tido um aumento significativo de número de pesquisas nessa última década, que foi ladeado pela vontade em direcionar a pesquisa desse autor para a compreensão de ecossistemas e estudos sobre a interação e o comportamento animal no meio ambiente.

Essas motivações desencadearam em longas, e quase infindáveis, horas de pesquisa e de dedicação às observações sobre pesquisas envolvendo sistemas bio-inspirados a fim de se poder extrair por um lado comportamentos que poderiam ser efetivamente utilizados em confederações de robôs inteligentes independentes e, por outro lado, um resultado prático como forma de um sistema computacional (simulador

nebuloso) implementado e aplicável, evitando que o trabalho ficasse apenas no campo divagação teórica e sob forma de uma contribuição unicamente textual fadada, provavelmente, a restar esquecida numa prateleira de uma biblioteca. Buscamos, literalmente, o bom anexim *plus valet passer in manibus, quam sub dubio grus*.

## 7.2 Trajetória percorrida

Durante o tempo de mestrado o autor dessa dissertação percorreu caminhos bastante distintos, mas que, finalmente, serviram para consolidar algumas experiências de pesquisa dentro do MASI. No primeiro ano letivo desenvolvemos trabalhos com o Prof. Carlos A. FRANCO na linha de neurociência computacional, o que muito nos ajudou para compreender as percepções sobre pesquisas aplicadas à vida. Depois passei a ser orientado pelo Prof. Cabral LIMA que tem compartilhado e orientado os meus recentes problemas científicos e que proclamou a decisão final para o tema dessa dissertação (e, sobretudo, nos deu um grande apoio moral). Decidimos assim que o foco de nosso trabalho seria sistemas bio-inspirados e modelagem matemática/computacional.

Desta forma, concentrei meus esforços na compreensão de pesquisas e experimentos elaborados na área de biologia visando encontrar algumas que pudessem ser efetivamente exploradas dentro do contexto de biorrobótica. Elaboramos uma criteriosa revisão dos principais periódicos dessa área e escolhemos uma interessante pesquisa concernindo à comunicação ornitológica. A idéia inicial se repousava sobre um modelo matemático/computacional a ser fundamentado na interação do canto de aves, considerados todos os ruídos externos a elas, que pudesse representar o ajuste sonoro (em amplitude e frequência) imprimido pelas aves a fim de maximizar o alcance de seu canto e manter a eficiência de sua comunicação.

A utilização desse modelo permitiria simular sensores capazes de se auto-

ajustarem, utilizando princípios biológicos encontrados em quatro espécies distintas de aves. Tínhamos algumas medidas limiaries em amplitude e frequência, ocorridas na comunicação entre duas aves, a *Melopsittacus undulatus* (conhecido como *Periquito*) e a *Taeniopygia guttata* (conhecida como Tentilhões-Zebra). Assim, estudamos os cantos de três aves, duas da mesma espécie (a terceira ave é a *Serinus canária*, simplesmente conhecida como *Canário*).

Esses limiaries permitem determinar o “espaço ativo” das aves. Os limiaries de detecção dos respectivos cantos variam de acordo com a forma espectral do ruído e essas informações fornecem a oportunidade em estimar, com precisão, a eficiência e o alcance real de comunicação entre aves. A eficiência do sinal é definida como sendo seu alcance (isto é, seu “espaço ativo”) e é medida em unidades de distância.

O modelo matemático/computacional proposto buscava representar cada tipo de ruído e o canto das aves através de equações diferenciais, atribuindo aos seus coeficientes propriedades encontradas em experimentos biológicos. Posto que a interação física entre duas ondas possui diversas propriedades (como as descritas pela teoria de interferência ondulatória) nossa idéia era a de se poder obter diversas valorações físicas a serem parametrizadas no nosso modelo, tais como a diferença de fase, a frequência e as amplitudes entre as ondas. A proposta inicial era, portanto, a de utilizar equações periódicas com amortecimento relativo para o sonograma das aves. A idéia final era a de que o modelo matemático/computacional poderia determinar a distância do *espaço ativo* das aves para eventuais novos ruídos através das soluções das equações diferenciais que lhe compunham.

Ainda que tenhamos tido certo sucesso na elaboração inicial desse modelo matemático para podermos partir para a etapa de validação, não dispúnhamos nem de recursos financeiros e nem de infra-estrutura especializada para efetuarmos experimentos empíricos e obter amostras confiáveis para validar nosso modelo matemático. Ficamos à mercê poder encontrar um banco de cantos de comunicação de pássaros que fosse

confiável e acessível o que, infelizmente, não ocorreu. Isto nos acarretou na “perda” de 1 (um) ano de esforços de pesquisa (com efeito, *non fuit in solo Roma peracta die*).

Assim sendo, tivemos que “mudar o norte” até acharmos um tema de viável aplicação na biorrobótica (e, sobretudo, na confederação de robôs inteligentes) e que não nos colocasse contratempos para obter informações de ordem empírica. Finalmente, o experimento biológico estudado nos levou à realização do simulador nebuloso descrito nessa dissertação.

## 7.4 Contribuições

Advogamos que a contribuição principal dessa dissertação foi comprovar que modelos nebulosos podem ser robustos e adequados para tratar dados, digamos, “negligentes”, existentes sobre migração sazonal noturna de aves. Com efeito, o nosso simulador com adequação nebulosa se mostrou eficiente para prever os ajustes a serem feitos pelas aves *Apus apus* quando em seus deslocamentos migratórios enfrentam ventos laterais que devem ser por elas compensados.

Outras contribuições que podem ser elencadas aqui concernem à descrição e à extensão de um modelo biológico e um modelo matemático [ALERSTAM 1989, LIECHTI 1994, 1995] para um modelo computacional com ajustes nebulosos. Esse modelo se mostrou bem aplicável no simulador quem foi capaz de prever o ajuste de direção e velocidade de uma ave migratória para compensar a influência de ventos laterais.

Esperamos que nossa pesquisa possa vir a contribuir para os estudos sobre tráfego aéreo que “dependem” de previsões sobre movimentos de aves migratórias. Uma outra contribuição nessa direção, ainda que derivativa, poderia estar ligada ao crescente

mercado de aeromodelos que poderia se beneficiar através da construção de novos controles síncronos que iriam corrigir a influência de ventos laterais. Mais fortemente, esperamos que tenhamos podido contribuir nas pesquisas sobre confederações de robôs inteligentes que, de forma autônoma, possam prever e corrigir alguns comportamentos para se adaptarem a eventos externos imprevistos que, por ventura, venham a acontecer.

## **7.5 Trabalhos futuros**

Alguns trabalhos futuros poderiam ajudar na consolidação da presente pesquisa:

1. Testar o simulador para várias novas amostras, inclusive relativas a outros tipos de ave e outros tipos de vento;
2. Elaborar novas propostas em substituição à lagrangeana e verificar sua aplicabilidade para o estudo em questão;
3. Melhorar substancialmente a interação do simulador, que se encontra
4. pobremente apresentável em termos de interação com o usuário. Utilização de computação gráfica de qualidade e um redesenho de apresentabilidade da tela principal seriam extremamente bem-vindos.
5. Adaptar o modelo nebuloso para simular outras realidades biológicas (por exemplo, um simulador para formigueiros artificiais).

## REFERÊNCIAS

[ALERSTAM 1979]ALERSTAM T.: Wind as selective agent in bird migration. **Ornis Scandinavica**, Vol. 10, No. 1, pp. 76-93, 1979.

[ANKIT 2011]ANKIT P.; HOTA A. R.: Ant colony optimization and hypergraph covering problems, 2011.

[AXELL 1963]AXELL, H. E.; D. Lack.: Migration at minsmere, see and unseen, 1963.

[BÄCKMAN 2002]BÄCKMAN J.; ALERSTAM T.: Harmonic oscillatory orientation relative to the wind in nocturnal roosting flights, **The Journal of Experimental Biology** 205, 905–910, 2002.

[BAJEC 2003]BAJEC I. L.; MRAZ M.; ZIMIC N.: Boids with a fuzzy way of thinking. **Proceedings of ASC**, 58-62, 2003.

[BAJEC 2005]BAJEC I. L.; MIHA M.; ZIMIC N.: Fuzzy model for a computer simulation of bird flocking, 2005.

[BAJEC 2009]BAJEC I. L.; FRANK H. H.: Organized flight in birds. **Animal Behaviour** 78 (2009) 777–789, 2009.

[BARR 1981]BARR, A.; FEIGENBAUM E.: The handbook of artificial intelligence , 1981.

[BARROS and BASSANEZI 2006]BARROS; BASSANEZI, 2006.: Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática. Campinas: **Unicamp**, 2006 .

[BATSCHÉLET 1981]BATSCHÉLET B.: Circular Statistics in Biology, 1981.

[BRAGA]BRAGA A.: Redes neurais artificiais.

[BEEKMAN 2008]BEEKMAN M.; GREGORY A.; STEPHEN J.: Foundations of Swarm Intelligence, 2008.

[BENI and WANG 1988]BENI G.; WANG J., 1988.: Swarm intelligence in cellular robotic systems, **Proceedings of the Advanced Workshop on Robots and Biological Systems** , 1988.

[BENI and WANG 1989]BENI, G.; WANG J.: Swarm intelligence. **In Proceedings Seventh Annual Meeting of the Robotics Society of Japan**, 425-428., 1989.

[BENI and WANG 1991]BENI, G.;WANG J.: Theoretical problems for the realization of distributed robotic systems, **In Proceedings 1991 IEEE International Conference on Robotic and Automation**, 1914-1920, 1991.

[BIALEK 2011]BIALEK W.; CAVAGNA A.; GIARDINA I.; MORA T.; SILVESTRI E.; VIALE M.; WALCZAK A.M.: Statistical mechanics for natural flocks of birds, 2011.

[BONABEAU 1999]BONABEAU E.; DORIGO M.; THERAULAZ G.: Swarm intelligence, from natural to artificial systems, New York, **Oxford University Press**, 1999.

[CAPELLO 2011]CAPELLO M.; SORIA M.; COTEL P.; DENEUBOURG L. J.; DAGORN L.: Quantifying the interplay between environmental and social effects on aggregated-fish dynamics, 2011.

[CHEN 2011]CHEN C.; TING C.J.: An ant colony optimization algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem, 2011.

[COIMBRA 2009]COIMBRA F. A.; MENDONÇA : Gerenciamento do perigo aviário

em aeroportos. **rev. Conexão SIPAER**, v. 1,n. 1, nov. 2009.

[COSTA 2007]COSTA D. N.: Simulador extensível para navegação de agentes baseados em inteligência de enxames, 2007.

[CRUZ 1994]CRUZ A. O.: Logica nebulosa, Rio de Janeiro, **UFRJ**, 1994.

[DEELDER and TINBERGEN]DEELDER L.; TINBERGEN.: Waarnemingen over de vlieghoogte van trekkende vinken, fringilla coebs spreeuwen, Sturnus vulgaris L.Ardea, 1947.

[DOKTER 2010]DOKTER A. M.; LIECHTI F.; STARK H.: Bird migration flight altitudes studies by a network of operational weather radar, **J. R. Soc. Interface published**, 2010.

[ERNI, BRUDERER and LIECHTI 2003]ERNI B.; LIECHTI F.; BRUDERER B.: How does a first year passerine migrant find its way? Simulating migration mechanisms and behavioural adaptations , **Oikos** 103: 333– 340, 2003.

[EVANS 1966]EVANS P.: An Approach to the Anallysis of Visible Migration and a Comparison With Radar Observations , 1966.

[FEIGENBAUM 1971]FEIGENBAUM, E.; BUCHANAN, B.; LEDERBERG, J. On generality and problem solving: a case study using the dendral program. **In: Machine Intelligence**, 1971.

[FISHER 1987]FISHER, B. J.: Guinness, Gosset, Fisher, and Small Samples. *Statistical Science* 2 (1): 45–52. DOI:10.1214/ss/1177013437, 1987.

[FLAKE 1999]FLAKE G.: The computational beauty of nature. Cambridge, **MA: MIT Press**, 1999.

[GARNIER 2007]GARNIER S. GAUTRAIS J., THERAULAZ G.: The biological

principles of swarm intelligence, 2007.

[GOBIRA 2008]GOBIRA A.B.: Modelagem do espalhamento de óleo em águas rasas, Vitória, **UFES**, 2008.

[GOLDSTEIN]GOLDSTEIN H.; WESLEY A.: Classical mechanics.

[GREEN 2002]GREEN M.; ALERSTAM T.: The problem of estimating wind drift in migrating birds, **J. theor. Biol.** 218, 485–496, 2002.

[HACKWOOD 1991]HACKWOOD, S.; G. BENI.: Self-organizing sensors by deterministic annealing, 1991.

[HACKWOOD 1992]HACKWOOD, S.; G. BENI.: Self-organization of sensors for swarm intelligence, 1992.

[HALLIDAY]HALLIDAY D.; RESNICK R.; WALKER J.: Fundamentos de física.

[HAYKIN]HAYKIN S.: Redes neurais : Princípios e práticas.

[HEDENSTRÖM 2002]HEDENSTRÖM A.: Adaptive variation of airspeed in relation to wind, altitude and climb rate by migrating birds in the arctic, **Behav Ecol Sociobiol** 52:308–317, 2002.

[HEDENSTRÖM 1995] HEDENSTRÖM A.; ALERSTAM T. Optimal flight speed of birds, **Phil. Trans. R. Soc. Lond. B**, 348, 471-487 1995.

[HENNINGSSON 2009]HENNINGSSON P.; KARLSSON H.; BACKMAN J.; ALERSTAM T.; HEDENSTROM A.: Flight speeds of swifts (*Apus apus*): seasonal differences smaller than expected, **Proc. R. Soc. B**, 276, 2395–2401, 2009.

[LANCZOS 1970]LANCZOS, C.: The variational principles of mechanics, Dover, New York, 1970.

[LEMOS 2000]LEMOS N.: Mecanica Analitica, Niterói, **UFF**, 2000.

[LIECHTI 1994]LIECHTI F. HEDENSTROM A.; ALERSTAM T.: Effects of sidewinds on optimal flight speeds of birds, **J. theor. Biol.** 170, 219-225, 1994.

[LIECHTI 1995]LIECHTI F.: Modeling optimal heading and airspeed of migrating birds in relation to energy expenditure and wind influence, **Journal of Avian Biology**, 26: 330-336. Copenhagen, 1995.

[LIECHTI 1999]LIECHTI F.: Bird migration across the Mediterranean, 1999.

[LIECHTI 2006]LIECHTI. F.: Birds: blowing' by the wind? **J Ornithol**, 147: 202–211, 2006.

[LIN 2011]LIN C.; WU G.; XIA F.; LI M.; YAO L.; PEI Z.: Energy efficient ant colony algorithms for data aggregation in wireless sensor Networks, 2011.

[LUSTOSA 2004]LUSTOSA V. G: O estado da arte em inteligência artificial , 2004.

[MAKIGUCHI 2009]MAKIGUCHI M.; INOUE J.I.: Numerical study on the emergence of anisotropy in artificial flocks: a birds modeling and simulations of empirical findings , 2009.

[MOTA 2008]MOTA A; MOTA L.: Especificação da iluminação no projeto de sistemas prediais de eletricidade utilizando um sistema especialista com regras nebulosas, 2008.

[NATAN e BARBOSA 2007]NATAN A.; BARBOSA V. C.: V-like formations in flocks of artificial birds, RJ, **UFRJ**, 2007.

[NELI 2001]NELI, R.: Aplicação da teoria de conjuntos fuzzy a problemas de biomedicina. SP, **USP**, 2001.

[NICLOUD 2009]NICLOUD J. D.; DENEUBOURG J.L.; FLOREANO D.: Swarm

intelligence in autonomous collective robotics : from tool to the analysis and synthesis of distributed control strategies, 2009 .

[NOGUEIRA 2007]NOGUEIRA, D.: Simulador Extensível para Navegação de Agentes Baseados em Inteligência de Enxames, 2007.

[KARLSSON 2010]KARLSSON H.; HENNINGSSON P.; BÄCKMAN J.: Compensation for wind drift by migrating swifts, 2010.

[PENNYCUICK 2008]PENNYCUICK, C. J.: Modeling the flying bird 2008.

[PENNYCUICK 1968]PENNYCUICK, C. J.: Power requirements for horizontal flight in the pigeon *Columbia livia*. *J. Exp. Biol.* 49, 527–555., 1968.

[PENNYCUICK 1975]PENNYCUICK, C.J.: Mechanics of flight. In: Farner, D.S. And King, J. R. (ed), **Avian Biology. Vol. 5., Academic Press, Ne York, 1975.**

[PENNYCUICK 1978]PENNYCUICK, C.J.: Fifteen testable predictions about bird flight. - **Oikos 30: 165-176.**, 1978.

[PENNYCUICK 1982]PENNYCUICK, C.J.: The flight of petrels and albatrosses (Procellariiformes), observed in South Georgia and its vicinity. - **Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. 300: 75-106**, 1982.

[PIAGET 1982]PIAGET, J.: O nascimento da inteligência na criança ,4ed R.J Zahar, 1982.

[RAJASTHAN 2011]RAJASTHAN: Automated software testing using metaheuristic technique based on an Ant colony optimization, 2011.

[RAVELING 1984]RAVELING D. G.; MICHAEL L. W.: Flight speed and directional responses to wind by migrating, Canada Geese, 1984.

[REYNOLDS 1987]REYNOLDS C.: Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model, 1987.

[RUSSEL 1923]RUSSEL, B.: Vagueness. **Australian Journal of Philosophy**, v1, 1923.

[RUSSELL]RUSSELL S.; NORVING P.: Inteligência artificial.

[SOMMERFELD 1952]SOMMERFELD A.: Mechanics, Academic Press, New York, 1952.

[SZWARCFITER 2002]SZWARCFITER J. L.; MARKENZON L.: Estruturas de dados e algoritmos, RJ, **UFRJ** 2002.

[UPADHYAY 2011]UPADHYAY R. K.: Weiming Wang, and N. K. Thakura spatiotemporal dynamics in a spatial plankton system , 2011.

[YEN 1999]YEN J.; LANGARI R.: Fuzzy logic, intelligence, control and information, 1999.

[WILCOCK 1964]WILCOCK J.: Radar and visible migration in Norfolk, 1964 .

[WILLEM 2003]WILLEM; BOUTEN; BELLE J. V.; BENABDELKADER.: Towards an operation bird avoidance system: combining models and mensurements, 2003.

[XAVIER 2003]XAVIER M.: Sistemas especialistas: uma introdução, 2003.

[ZADEH 1965]ZADEH: Information and Control, 1965.

[ZHANG 2010]ZHANG L.; JEFF D. E.: Hydrodynamics of undulatory fish schooling in lateral configurations, 2010.

[ZIMMEMANN 1985] ZIMMEMANN. H.: Fuzzy set theory- and its applications; Boston EUA: Kluwer-Nijhof Publishing, 1985.