

REGRAS DISTRIBUÍDAS PARA SIMULAÇÃO DO VÔO EM FORMAÇÃO DE
PÁSSAROS ARTIFICIAIS

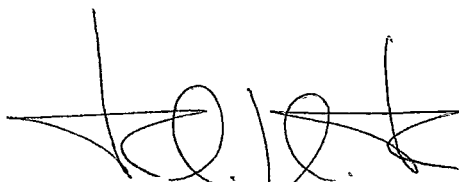
Andre Nathan

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:



Prof. Valmir Carneiro Barbosa, Ph.D.



Prof. Felipe Maia Galvão França, Ph.D.



Prof. Lúcia Maria de Assumpção Drummond, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2007

NATHAN, ANDRE

Regras distribuídas para simulação do vôo em formação de pássaros artificiais [Rio de Janeiro] 2007

XI, 85 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Pássaros artificiais
2. *Boids*
3. Formação de vôo em V
4. Vida artificial
5. Comportamento emergente

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Agradecimentos

Agradeço à minha família, amigos e professores pelo apoio e compreensão recebidos durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REGRAS DISTRIBUÍDAS PARA SIMULAÇÃO DO VÔO EM FORMAÇÃO DE PÁSSAROS ARTIFICIAIS

Andre Nathan

Abril/2007

Orientador: Valmir Carneiro Barbosa

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Dois modelos para a simulação do vôo em formação de bandos de pássaros são desenvolvidos. Os pássaros artificiais são guiados por regras distribuídas inspiradas nas duas hipóteses biológicas que tentam explicar o fenômeno do movimento agregado em formações semelhantes a V's. Por meio de simulações, demonstra-se que estes atingem formações realistas, analisadas quantitativamente pelo uso de indicadores que acredita-se serem fortemente relacionados a formações deste tipo. O comportamento dos pássaros é estudado com base em um grande número de simulações independentes.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DISTRIBUTED RULES FOR THE SIMULATION OF FORMATION FLIGHT OF
ARTIFICIAL BIRDS

Andre Nathan

April/2007

Advisor: Valmir Carneiro Barbosa

Department: Systems Engineering and Computer Science

Two models for the flight simulation of bird flocks are developed. The artificial birds are guided by distributed rules inspired by the two biological hypotheses which attempt to explain the flocking phenomenon of V-like formations. By means of simulations, it is demonstrated that the artificial birds reach realistic formations, which are analyzed quantitatively through indicators which are believed to be closely related to achieving formations of this kind. The behavior of the birds is studied over a large set of independent simulations.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| Lista de Figuras | viii |
| Lista de Tabelas | xi |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Vida artificial | 1 |
| 1.1.1 Autômatos celulares | 2 |
| 1.1.1.1 A classificação de autômatos celulares de Wolfram . . | 4 |
| 1.1.1.2 Auto-reprodução, computação universal e o Jogo da Vida | 6 |
| 1.1.2 Comportamento emergente | 9 |
| 1.1.3 O estado da arte em vida artificial | 12 |
| 1.1.3.1 Robótica evolucionária | 12 |
| 1.1.3.2 Evolução de organismos digitais | 13 |
| 1.1.3.3 Inteligência de enxame | 13 |
| 1.1.3.4 Computação gráfica | 14 |
| 1.1.3.5 Modelagem de fenômenos naturais | 14 |
| 1.1.3.6 Internet e processamento de informação | 15 |
| 1.1.3.7 Eletrônica | 16 |
| 1.1.3.8 Segurança da informação | 16 |
| 1.1.3.9 Mineração de dados | 17 |
| 1.1.4 Problemas em aberto | 17 |
| 1.2 O rebanho egoísta | 19 |
| 1.3 Roteiro do trabalho | 20 |
| 2 Formações de vôo de bandos de pássaros | 21 |
| 2.1 Hipóteses biológicas para o vôo em formação | 21 |
| 2.1.1 A hipótese da aerodinâmica | 24 |
| 2.1.2 A hipótese da orientação visual | 26 |
| 2.1.3 O modelo utilizado | 27 |
| 2.2 Trabalhos relacionados | 28 |
| 2.2.1 Os pássaros artificiais de Reynolds | 29 |
| 2.2.2 Uma nova regra para os <i>boids</i> | 31 |
| 2.2.3 <i>Boids</i> com pensamento fuzzy | 32 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Algoritmo para pássaros de grande porte | 37 |
| 3.1 | Introdução | 37 |
| 3.2 | Definições | 40 |
| 3.3 | O algoritmo | 42 |
| 3.3.1 | Regra de busca de lacunas | 44 |
| 3.3.2 | Deslocamentos laterais | 45 |
| 3.4 | Comentários sobre o algoritmo | 47 |
| 3.4.1 | Decisões locais | 47 |
| 3.4.2 | Tratamento de colisões | 47 |
| 3.4.3 | Estabilidade das formações | 48 |
| 4 | Resultados da simulação para pássaros de grande porte | 50 |
| 4.1 | Introdução | 50 |
| 4.2 | Simulações | 51 |
| 5 | Algoritmo para pássaros de pequeno porte | 60 |
| 5.1 | Introdução | 60 |
| 5.2 | Definições | 62 |
| 5.3 | O algoritmo | 64 |
| 5.3.1 | Regra de desobstrução da visão | 66 |
| 5.3.2 | Deslocamentos laterais | 66 |
| 6 | Resultados da simulação para pássaros de pequeno porte | 68 |
| 6.1 | Introdução | 68 |
| 6.2 | A importância da visão em formações de vôo | 73 |
| 7 | Conclusão | 77 |
| 7.1 | Comentários sobre o trabalho | 77 |
| 7.2 | Trabalhos futuros | 78 |
| 7.3 | Considerações finais | 80 |
| | Referências Bibliográficas | 81 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | A Regra 90 ($90 = 01011010_2$) especifica que o estado futuro de uma célula é 1 se os estados das células vizinhas forem diferentes entre si, e 0 caso contrário. | 3 |
| 1.2 | Evolução de um autômato celular obedecendo a Regra 90. A configuração inicial consiste de todas as células no estado zero, com exceção da célula central, que está no estado 1. | 3 |
| 1.3 | Evolução de um autômato celular obedecendo a Regra 90. A configuração inicial é aleatória. | 4 |
| 1.4 | Exemplos de autômatos celulares das classes I (a), II (b), III (c) e IV (d). | 5 |
| 1.5 | A vizinhança de uma célula em <i>Life</i> | 7 |
| 1.6 | Construção de primitivas lógicas com <i>Life</i> | 8 |
| 1.7 | Um ninho construído por uma colônia de cupins | 9 |
| 1.8 | Evolução no tempo de uma colônia de cupins artificiais simulada por Resnick. | 11 |
| 1.9 | Um sapo reduz sua região de perigo movendo-se para uma região entre dois outros sapos. | 19 |
| 2.1 | Pássaros voando em uma formação que assemelha-se a um V. | 22 |
| 2.2 | Formações de vôo coordenado comumente observadas na natureza: escalão (a), V (b), J (c), V invertido (d), J invertido (e) e V ramificado (f). | 23 |
| 2.3 | O campo aerodinâmico e o fluxo de ar vertical formado atrás das asas no modelo de Lissaman e Shollenberger. | 24 |
| 2.4 | Economia de energia versus espaçamento entre as asas. O ganho decai rapidamente à medida em que a distância entre as pontas das asas afasta-se do seu ponto ótimo. | 25 |
| 2.5 | Movimento em grupo alcançado por pássaros artificiais obedecendo às regras de Reynolds. A formação do grupo assemelha-se mais fortemente à um cardume ou rebanho. | 31 |
| 2.6 | Comparação entre uma série de quadros equidistantes no tempo exibindo o comportamento de vôo em grupo no modelo de Reynolds (primeira linha) e do modelo fuzzy de Lebar Bajec <i>et al.</i> (segunda linha). | 35 |

| | | |
|-----|---|----|
| 2.7 | Comparação entre uma série de quadros equidistantes no tempo exibindo o comportamento de vôo a partir de um agrupamento circular. As primeira linha corresponde ao modelo de Reynolds, enquanto as demais correspondem ao modelo de Lebar Bajec <i>et al.</i> | 35 |
| 2.8 | Comparação entre uma série de quadros equidistantes no tempo exibindo o comportamento de vôo a partir de uma formação em linha reta. A primeira linha corresponde ao modelo de Reynolds, e a segunda corresponde ao modelo de Lebar Bajec <i>et al.</i> Com estas condições iniciais, o modelo fuzzy apresentou um comportamento comparável a formações de vôo observadas na natureza. | 36 |
| 3.1 | As regiões de fluxo de ar positivo (U_i^- e U_i^+) e negativo (D_i) do pássaro i em vôo. O pássaro j está posicionado de maneira a obter uma redução máxima no esforço de vôo. | 40 |
| 3.2 | As coordenadas dos pássaros i e j , bem como as distâncias entre eles, são medidas com relação ao centro do círculo correspondente aos seus corpos. | 42 |
| 3.3 | Lacunas maximais. As lacunas L_1 e L_3 são delimitadas, respectivamente, pela extremidade da asa esquerda de i e pela extremidade da asa direita de j , e têm largura infinita. A lacuna L_2 é delimitada pela extremidade da asa direita de i e pela extremidade da asa esquerda de j , e portanto tem sua largura definida pela distância horizontal entre as duas extremidades. | 44 |
| 3.4 | O cone de visão do pássaro i , correspondente à lacuna entre as extremidades das asas dos pássaros j e k . Esta lacuna não é visível para i pois parte de uma das asas do pássaro l está contida na região delimitada por seu cone de visão. | 45 |
| 3.5 | No instante t_0 , i encontra-se na posição $x_i(t_0)$ no eixo x , e $\mathcal{S}_i(t_0) = \{j, k\}$. Portanto, i identifica como lacuna mais próxima de si a lacuna delimitada à esquerda pela extremidade da asa direita de k , e de comprimento infinito. Ao mover-se lateralmente no instante t_1 para $x_i(t_1)$, $\mathcal{S}_i(t_1) = \mathcal{S}_i(t_0) + l$, e assim a lacuna-alvo de i passa a ser delimitada à direita pela extremidade da asa esquerda de l . Com isso, a lacuna passa a não possuir a largura mínima de $w + 2\lambda$ necessária para pertencer a $\mathcal{G}_i(t)$, e então a nova lacuna mais próxima de i passa a ser aquela delimitada à direita pela extremidade da asa esquerda do pássaro j , fazendo com que no próximo instante de tempo, t_3 , $x_i(t_3) = x_i(t_0)$. Se os pássaros j , k e l estiverem estáveis, então i permanecerá alternando sua posição, em um comportamento oscilatório que ocorrerá indefinidamente. Na figura, o deslocamento lateral de i aparece fora de escala para facilitar a visualização das condições que levam a este comportamento. | 49 |
| 4.1 | O quadrado de lados unitários paralelos aos eixos x e y . No início da simulação, os pássaros artificiais são dispostos aleatoriamente no seu interior. | 51 |
| 4.2 | Evolução no tempo de um grupo de pássaros a partir de uma configuração inicial aleatória no instante de tempo $t = 0$ até ser alcançada a estabilidade no instante $t = 200$ | 53 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.3 | Formação de vôo com dois grupos desconexos. | 54 |
| 4.4 | Formação de vôo com dois segmentos de reta, exibidos com linhas tracejadas. O segundo pássaro a partir do topo causa uma “bifurcação” na formação. | 55 |
| 4.5 | Formações de vôo para os pássaros artificiais após $T = 2000$ intervalos de tempo, atingidas a partir de configurações iniciais aleatórias independentes para $n = 15$ e $\alpha = 180^\circ$. As formações correspondem às configurações em V (a), J (b) e escalão (c) catalogadas por Heppner. | 56 |
| 4.6 | Formações de vôo para os pássaros artificiais após $T = 2000$ intervalos de tempo, atingidas a partir de configurações iniciais aleatórias independentes para $n = 15$ e $\alpha = 170^\circ$. Em (a), a formação em W corresponde à união dois J’s. Em (b), pode-se observar dois grupos desconexos, e em (c), observa-se a formação em V invertido. | 57 |
| 4.7 | Média de 1000 simulações independentes dos cinco indicadores (a–e) e a evolução no tempo do quinto indicador para dez simulações escolhidas aleatoriamente com $n = 25$ e $\alpha = 170^\circ$ (f). | 59 |
| 5.1 | A distância mínima Λ para que o pássaro i tenha sua visão desobstruída, e as distâncias vertical e horizontal, d e ℓ , respectivamente, que delimitam a região de proximidade determinando a pertinência ao bando. | 62 |
| 5.2 | O pássaro i tem sua visão desobstruída se a faixa longitudinal de largura 2Λ , com centro em $x_i(t)$, não interceptar qualquer parte do corpo ou asas dos demais membros do bando. | 63 |
| 5.3 | A distância mínima para a desobstrução da visão pode ser interpretada em termos da separação entre os pássaros artificiais, com o parâmetro λ | 65 |
| 6.1 | Média de 1000 simulações independentes de pássaros de pequeno porte para os cinco indicadores (a–e) definidos no Capítulo 4 e a evolução no tempo do quinto indicador para dez simulações escolhidas aleatoriamente com $n = 25$ e $\alpha = 170^\circ$ (f). | 70 |
| 6.2 | O pássaro j encontra-se em uma situação de estabilidade, mesmo posicionado atrás dos pássaros i e k , pois critério de desobstrução visual é satisfeito. Esta configuração é a base para o surgimento de formações com mais de dois segmentos de reta, mesmo com $\alpha = 180^\circ$ | 71 |
| 6.3 | Formações de vôo para pássaros artificiais de pequeno porte com $\alpha = 180^\circ$. O critério de desobstrução visual permita emergência de configurações em V’s e J’s ramificados, levando a um número médio de segmentos de reta maior do que dois, mesmo havendo apenas um pássaro líder. | 72 |
| 6.4 | Evolução da distância máxima entre dois membros de bandos de pássaros artificiais de pequeno porte para $\Lambda = 10$ (a) e $\Lambda = 0$ (b) em dez simulações escolhidas aleatoriamente com $n = 25$ e $\alpha = 180^\circ$ | 74 |
| 6.5 | Formações de vôo para pássaros artificiais com $\Lambda = 0$ e $\alpha = 180^\circ$. O fato de que os pássaros nestas condições não precisam buscar a desobstrução visual impede a emergência de formações claras como as tradicionalmente catalogadas. | 76 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Valores dos parâmetros para pássaros de grande porte (Multiplicados por 768). | 52 |
| 6.1 | Valores dos parâmetros para pássaros de pequeno porte (Multiplicados por 768). | 69 |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Vida artificial

A vida artificial é um campo de estudo amplo e multidisciplinar que tem como objetivo o estudo da vida por meio de simulações, sintetizando o comportamento de sistemas vivos em software, hardware e materiais bioquímicos [5]. A vida artificial pode ser dividida em três ramos que correspondem aos diferentes métodos de sintetização empregados no desenvolvimento da pesquisa na área:

Soft artificial life: trabalha com a criação de simulações em software para a construção de processos semelhantes à vida.

Hard artificial life: produz implementações em hardware de sistemas com comportamento que assemelha-se à vida.

Wet artificial life: sintetiza sistemas vivos a partir de substâncias bioquímicas.

Cunhado primeiramente por Langton no final da década de 80, o termo “vida artificial” refere-se portanto à disciplina que estuda a vida natural por meio da recriação de fenômenos biológicos [29]. Assim, a vida artificial tenta complementar a abordagem analítica da biologia tradicional com uma abordagem sintética: a criação de sistemas que comportam-se como organismos vivos, em especial por meio de simulações em computadores.

1.1.1 Autômatos celulares

O trabalho de Langton tem suas raízes nos estudos do matemático John von Neumann, que procurava, em termos gerais, o tipo de organização lógica suficiente para tornar possível a construção de uma máquina capaz de auto-reproduzir-se [65]. Von Neumann, tendo em mente o fenômeno natural da auto-reprodução, desejava extrair deste a sua forma lógica, sendo o pioneiro na captura da essência da abordagem empregada pela vida artificial.

Inicialmente, von Neumann trabalhava em seu “modelo cinemático”, baseado na noção de um construtor universal, uma máquina que, tendo à sua disposição um conjunto de diferentes partes de máquinas, e alimentada com a descrição de uma máquina qualquer, pudesse localizar neste conjunto as partes adequadas para a construção da mesma. Se ao construtor universal fosse fornecida uma descrição de si próprio, uma cópia deste seria construída. Entretanto, von Neumann, insatisfeito com seu modelo, devido à dificuldade de analisá-lo com o rigor matemático apropriado, passou a buscar um sistema formal que pudesse ser utilizado para modelar a auto-reprodução. O formalismo adequado, sugerido por Stan Ulam, um dos colegas de von Neumann no laboratório de Los Alamos, no Novo México, foi o que passaria a ser conhecido como um modelo de autômatos celulares.

Autômatos celulares podem ser descritos em termos simples como reticulados compostos por células, cada uma das quais pertencente a um estado escolhido dentre um número finito destes. O estado de cada célula é atualizado simultaneamente em intervalos de tempo discretos de acordo com uma regra de atualização, em geral determinística, que tem como entrada os estados da própria célula e de células vizinhas, de acordo com alguma definição de vizinhança, no intervalo de tempo atual.

A classe mais simples de autômatos celulares unidimensionais, elementares [67], é composta por autômatos com dois estados possíveis para cada célula (0 ou 1), cujas regras de atualização dependem apenas dos estados atuais da própria célula e das duas células adjacentes. Em outras palavras, a evolução de um autômato celular elementar pode ser descrita por uma tabela que especifica o próximo estado de uma célula, dados os estados atuais da mesma e das células imediatamente à sua esquerda e direita. Como existem $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$ possíveis estados para cada conjunto de três células, há

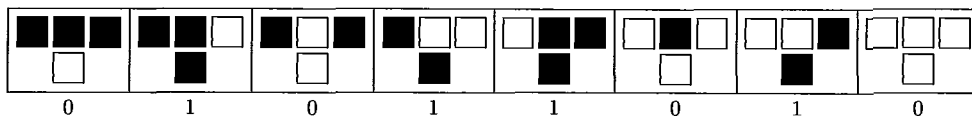


Figura 1.1: A Regra 90 ($90 = 01011010_2$) especifica que o estado futuro de uma célula é 1 se os estados das células vizinhas forem diferentes entre si, e 0 caso contrário.

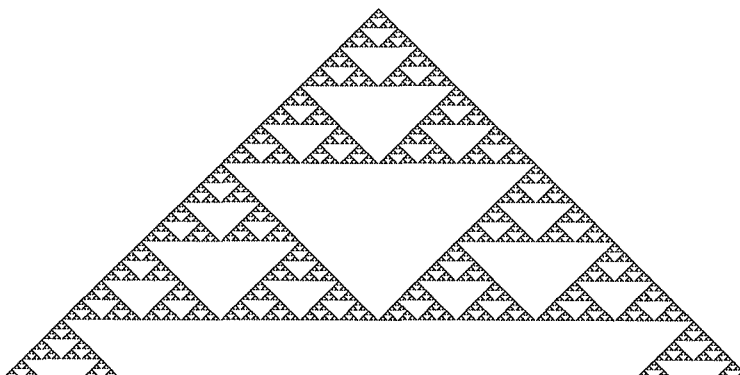


Figura 1.2: Evolução de um autômato celular obedecendo à Regra 90. A configuração inicial consiste de todas as células no estado zero, com exceção da célula central, que está no estado 1.

$2^8 = 256$ possíveis autômatos celulares elementares, e cada regra pode ser representada utilizando-se números binários de 8 bits correspondentes ao estado alcançado a partir de cada configuração possível para uma célula e suas duas células vizinhas. A Figura 1.1 ilustra a tabela correspondente à Regra 90 ($90 = 01011010_2$), que especifica que o estado de uma célula é 1 se, no intervalo de tempo anterior, os estados de suas células vizinhas forem diferentes entre si, e 0 em caso contrário. Matematicamente, a Regra 90 pode ser expressa como

$$a_i(t + 1) = [a_{i-1}(t) + a_{i+1}(t)] \bmod 2, \quad (1.1)$$

onde $a_i(t)$ representa o estado da célula localizada na posição i , no instante de tempo t .

As Figuras 1.2 e 1.3 ilustram a evolução de autômatos celulares obedecendo à Regra 90 a partir de uma configuração inicial trivial (apenas a célula central com estado 1 e todas as demais com estado 0) e uma configuração inicial aleatória, respectivamente, ao longo do tempo (eixo vertical).

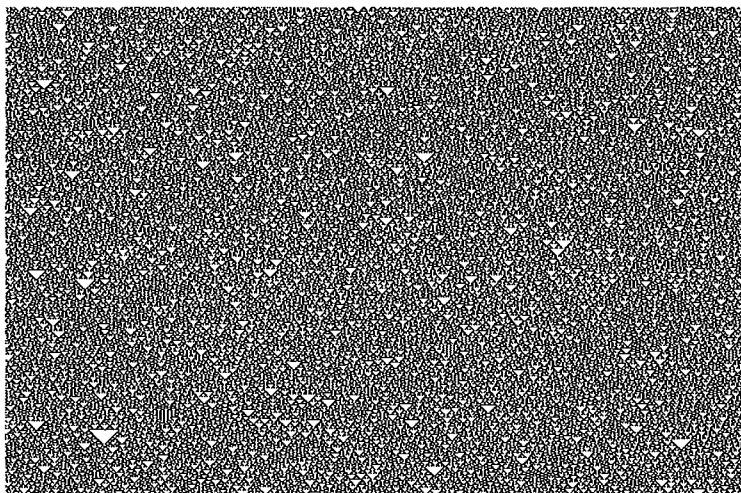


Figura 1.3: Evolução de um autômato celular obedecendo a Regra 90. A configuração inicial é aleatória.

1.1.1.1 A classificação de autômatos celulares de Wolfram

Wolfram foi o responsável pela renovação da pesquisa relacionada a autômatos celulares na década de 80. Uma de suas contribuições foi a classificação de autômatos celulares em quatro grupos de acordo com o comportamento de sua evolução no tempo [67].

Classe I: Autômatos celulares na primeira classe sempre evoluem para um arranjo homogêneo, onde todas as células pertencem ao mesmo estado, que nunca será modificado.

Classe II: Autômatos celulares na segunda classe formam arranjos periódicos que modificam ciclicamente suas estruturas.

Classe III: Autômatos celulares na terceira classe evoluem de forma a gerar padrões aleatórios “aperiódicos”.

Classe IV: Autômatos celulares na quarta classe formam padrões complexos com estruturas localizadas que movem-se ao longo do tempo. Os padrões devem, em algum momento no futuro, tornar-se homogêneos, como na Classe I ou periódicos, como na Classe II.

O termo “aperiódicos” utilizado na descrição dos autômatos celulares da terceira classe deve ser utilizado com a ressalva de que, dado um espaço finito de estados, a configuração de um autômato celular cuja evolução seja observada por tempo suficiente

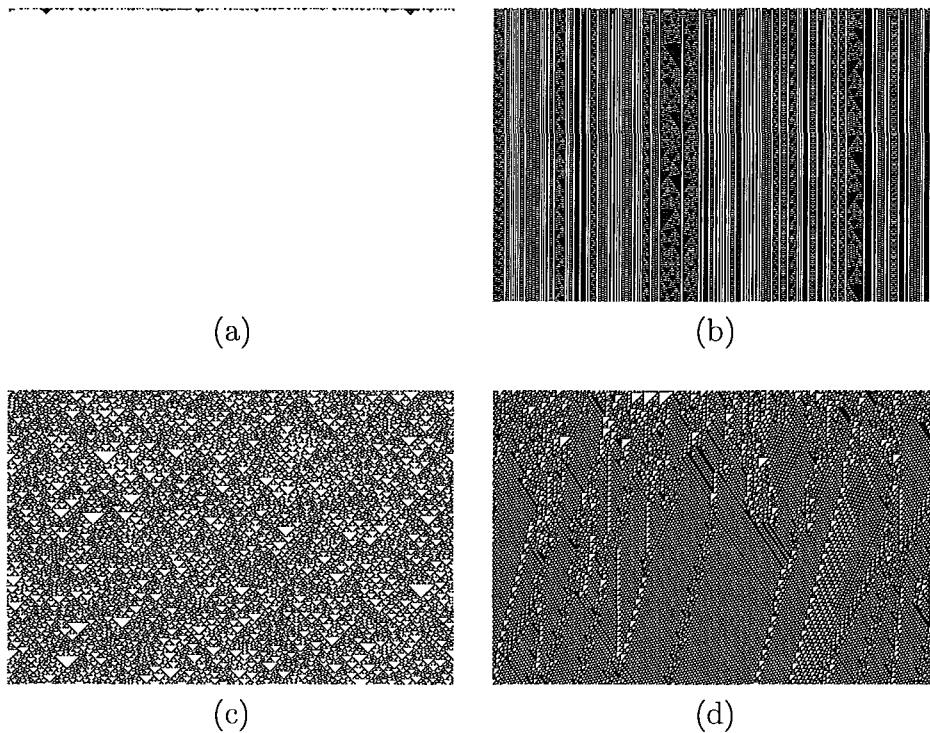


Figura 1.4: Exemplos de autômatos celulares das classes I (a), II (b), III (c) e IV (d).

irá inevitavelmente repetir-se, embora o número total de configurações possíveis, com exceção de casos triviais, seja extremamente grande.

As Figuras 1.4(a–d) ilustram exemplos de cada uma das classes de autômatos celulares definidas por Wolfram.

Em autômatos celulares da Classe I, o comportamento é simples e a sua evolução leva a um estado final uniforme, de maneira que qualquer informação codificada na configuração inicial é perdida. Na Classe II, há diversos estados finais possíveis, todos eles compostos por um conjunto de estruturas simples e imutáveis, ou com padrões que repetem-se após um certo período de tempo. Na Classe III, o comportamento é aleatório, embora algumas estruturas básicas possam ser observadas em alguns casos, como os triângulos na Figura 1.4(c). Já os autômatos celulares da Classe IV são constituídos por uma composição entre ordem e aleatoriedade, onde estruturas simples, mas capazes de mover-se e interagir entre si de maneiras complexas são produzidas.

O interesse primordial na classificação de Wolfram é direcionado aos autômatos celulares da Classe IV. O comportamento dinâmico destes autômatos parece flutuar numa fronteira entre os comportamentos de caos e periodicidade, e em geral autômatos

celulares desta classe são capazes de realizar computação. Mais especificamente, alguns autômatos celulares da Classe IV são capazes de realizar computação universal.

1.1.1.2 Auto-reprodução, computação universal e o Jogo da Vida

Von Neumann projetou um sistema equivalente ao seu modelo cinemático em um autômato celular complexo, com 29 estados por célula. Este modelo pode ser considerado como o primeiro modelo de vida artificial, embora seu autor não tenha referido-se a ele como tal.

Autômatos celulares podem ser considerados como a prova de que uma característica essencial de organismos vivos – a capacidade de auto-reprodução – pode ser aplicada a sistemas computacionais. O exemplo canônico de auto-reprodução em autômatos celulares é o celebrado jogo *Life*, de Conway [15]. O objetivo de Conway era, motivado pelo trabalho de von Neumann, encontrar a descrição mais simples de um autômato celular que pudesse suportar computação universal. O autômato celular de Conway é um autômato celular bidimensional pertencente à Classe IV segundo a classificação de Wolfram, e possui apenas dois estados: as células podem estar vivas ou mortas. O conjunto de regras governando a evolução do autômato é bastante simples.

Sobrevivência: Células vivas com dois ou três células vizinhas vivas sobrevivem para a próxima geração.

Morte: Células vivas com quatro ou mais vizinhos vivos morrem devido à superpopulação. Células vivas com menos de dois vizinhos vivos morrem devido ao isolamento.

Nascimento: Células vazias com exatamente três vizinhos vivos ganham vida.

Em *Life*, a vizinhança de uma célula é composta pelas células adjacentes nas oito direções, como ilustrado na Figura 1.5.

As leis que governam a genética de Conway, embora extremamente simples, contêm as características mais básicas de como organismos vivos interagem entre si, levando em consideração restrições relativas à densidade populacional e as condições apropriadas à reprodução.

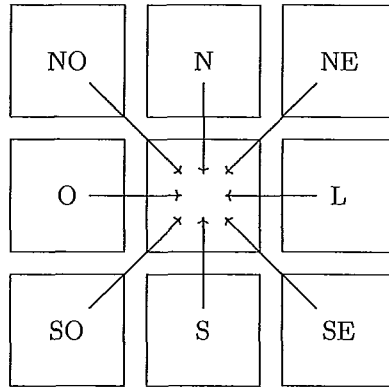


Figura 1.5: A vizinhança de uma célula em *Life*.

O interesse em *Life* vem do fato de que este autômato possui o mesmo poder computacional de uma máquina de Turing [52]. Embora uma prova desta equivalência esteja além do escopo deste trabalho, é possível descrever em termos gerais como *Life* pode ser utilizado para realizar computação. No jogo da vida, diversas formas e padrões podem ser observados. Mais especificamente, estes podem ser divididos em três classes de objetos, cada uma delas relevante a um aspecto necessário à possibilidade da realização de computação [14].

Em objetos estáticos, cada célula viva tem dois ou três vizinhos, e células vazias possuem menos de dois ou mais de três vizinhos, de forma que a composição permanecerá idêntica durante todas as gerações subseqüentes da execução. A existência de objetos persistentes no tempo permite a implementação de uma forma simples de memória.

Objetos periódicos possuem a propriedade de retornar a uma determinada configuração base após um certo número de gerações. Desta forma, torna-se possível a implementação de contadores, permitindo que estes sejam utilizados na sincronização de eventos paralelos e no controle de iterações.

Por fim, objetos móveis, genericamente referidos como *gliders*, possuem a habilidade de deslocar-se ao longo do reticulado com a evolução das gerações. O movimento dos *gliders* pode ser utilizado para contruir outros objetos, por meio de colisões projetadas de maneira precisa. O processo pode ser projetado de forma que, por meio da montagem recursiva de componentes, seja construída uma máquina capaz de auto-reprodução, atingindo assim a meta do trabalho idealizado por von Neumann.

Seja um *canhão de gliders* uma configuração que tenha a habilidade de emitir os mesmos. Podemos então construir primitivas lógicas, como ilustrado na Figura 1.6. Na

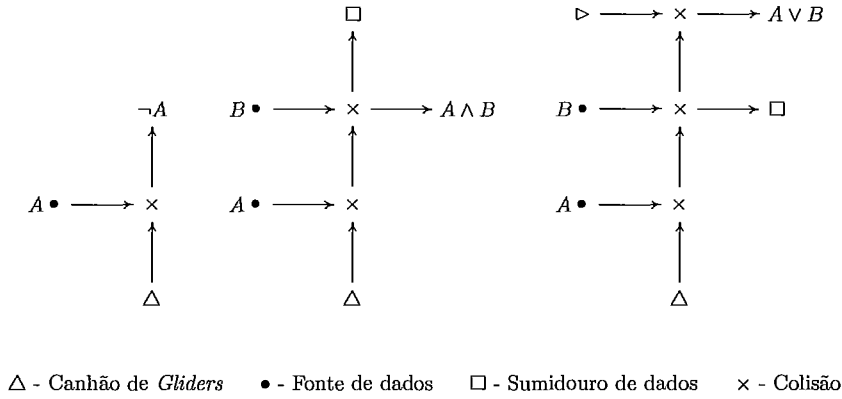


Figura 1.6: Construção de primitivas lógicas com *Life*.

parte da esquerda da figura, pode ser observada a construção que computa a operação de negação lógica. O canhão de *gliders*, localizado na parte inferior do circuito, emite um fluxo contínuo destes, enquanto a fonte de dados emite um *glider* apenas quando existe um bit com valor 1 no fluxo de dados. Desta forma, quando houver um bit 1 em A , um *glider* será emitido, forçando a ocorrência de uma colisão com o *glider* emitido pelo canhão, cujo efeito é a aniquilação de ambos os *gliders*. Quando há um valor 0 em A , a fonte de dados não emite um *glider*, o que faz com que não exista colisão, e permite que o *glider* emitido pelo canhão atravesse o circuito livremente. Assim, esta construção efetivamente corresponde à operação de negação lógica de uma seqüência de bits. Nos demais circuitos ilustrados na Figura 1.6, composições utilizando o circuito que realiza a operação de negação lógica como elemento fundamental são construídas para a obtenção dos circuitos correspondentes às operações lógicas E e OU.

Embora existam diversos outros problemas a serem resolvidos no que diz respeito à implementação real de um computador digital, como aspectos de sincronização e requerimentos de memória, é possível reconhecer, com as construções acima exemplificadas, que tal implementação pode ser realizada.

É preciso observar que, embora a auto-reprodução seja um aspecto fundamental para a vida, o processo não é suficiente para a existência desta. As configurações capazes de auto-reprodução assemelham-se mais fortemente a cristais em crescimento do que a organismos vivos, pois são incapazes de evoluir. Fatores relevantes à superação desta limitação foram explorados em trabalhos recentes, como em [55], onde autômatos celulares capazes de auto-reprodução são capazes de evoluir e tornar-se mais complexos, e [43], onde é demonstrada a emergência de estruturas mais realistas capazes de auto-

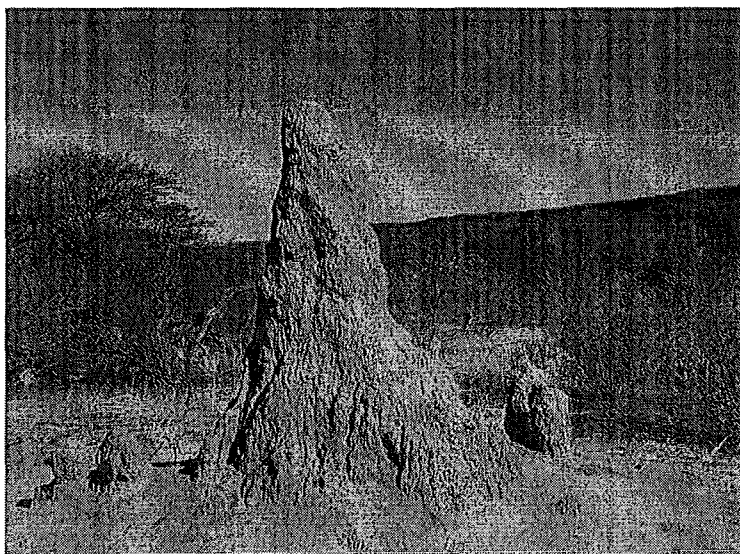


Figura 1.7: Um ninho construído por uma colônia de cupins

reprodução.

1.1.2 Comportamento emergente

Muitos sistemas na natureza são compostos por diversos indivíduos interagindo por meio de ações simples e localizadas, por intermédio das quais emergem padrões globais complexos que não podem em geral ser previstos analisando-se as regras que regem o seu comportamento. Tal característica é denominada *comportamento emergente*, e dentre os diversos exemplos observados na natureza, podem ser citados o processamento paralelo e distribuído de informações sensoriais por conjuntos de neurônios no cérebro, a construção de ninhos de arquitetura complexa por colônias de insetos, o movimento em conjunto de peixes em cardumes, as formações de vôo em bandos de pássaros migratórios e a determinação ótima de preços que surge por meio da obediência às leis do comércio por parte dos agentes neste envolvidos. A Figura 1.7 é um exemplo clássico de emergência na natureza: o complexo ninho construído por uma colônia de cupins.

Em [53], Mitchel Resnick estuda uma grande variedade de sistemas compostos por agentes simples cujas interações resultavam na emergência de comportamentos e padrões complexos. Um desses sistemas é composto por cupins artificiais, cada um guiado por três regras simples:

Regra 1: Caminhar aleatoriamente até encontrar um pedaço de madeira.

Regra 2: Se o cupim estiver carregando um pedaço de madeira, ele o abandona e continua a caminhar aleatoriamente.

Regra 3: Caso contrário, ele pega o pedaço de madeira encontrado e continua a caminhar aleatoriamente.

Nas palavras de Resnick,

Embora eu esteja ciente do poder de regras simples, estas regras pareceram um pouco simples demais. Não havia qualquer mecanismo para evitar que cupins pegassem pedaços de madeira de pilhas existentes. Então, enquanto alguns cupins estão colocando novos pedaços de madeira em uma pilha, outros cupins podem estar removendo pedaços de madeira da mesma.

O comportamento do sistema, entretanto, não confirmou esta intuição inicial, como demonstrado pela evolução da simulação ilustrada na Figura 1.8. A configuração inicial consiste de pedaços de madeira distribuídos de maneira aleatória em um reticulado bidimensional, onde os pontos de uma extremidade são considerados vizinhos dos pontos correspondentes na extremidade oposta. A evolução da simulação demonstra que, com o passar do tempo, os montes de madeira são agrupados em coleções bem definidas. Embora não haja qualquer líder neste sistema, e cada cupim tome suas ações de maneira independente, eles são capazes de produzir uma estrutura que possui organização global, a despeito da restrição que os obriga a agir com base apenas em decisões locais.

A explicação para a configuração global alcançada vem da observação de que uma vez que todos os pedaços de madeira de uma pilha sejam removidos, os cupins não irão mais depositar pedaços de madeira ali, já que pela Regra 2, pedaços de madeira são depositados apenas em pilhas pré-existentes. À medida que o sistema evolui, algumas pilhas desaparecem, e nenhuma nova pilha é criada, de forma que o número de pilhas diminui monotonicamente.

A motivação para a utilização de agentes descentralizados interagindo por meio de regras simples para a obtenção de um comportamento global é dada pelas vantagens inerentes a um sistema deste tipo, quando comparados a sistemas com controle centralizado. A coordenação centralizada acarreta na existência de custos substanciais em

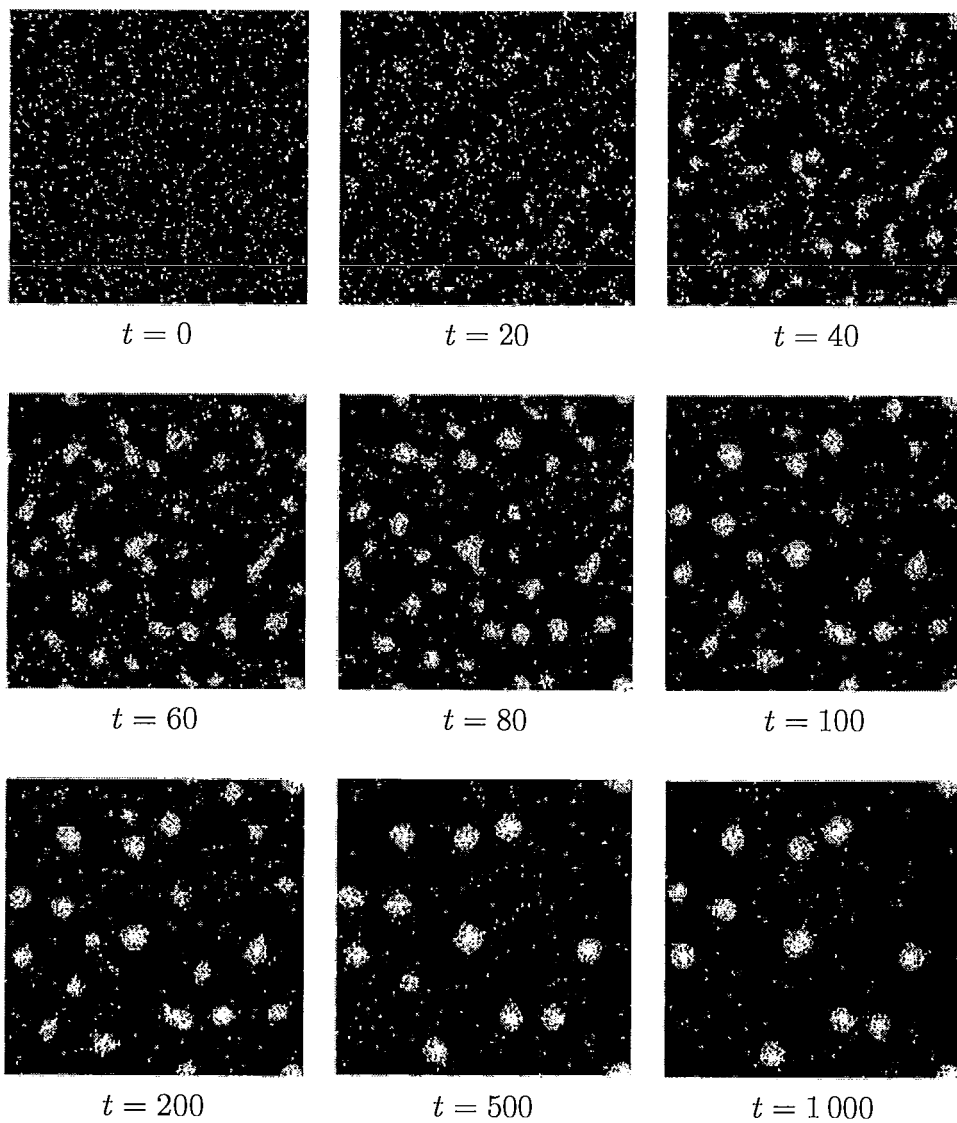


Figura 1.8: Evolução no tempo de uma colônia de cupins artificiais simulada por Resnick.

aspectos como velocidade (o coordenador centralizado pode ser um gargalo para o processamento da informação), robustez (o colapso do coordenador centralizado implica no colapso do sistema) e distribuição justa de recursos (um coordenador centralizado exige uma grande parte dos recursos disponíveis, que poderia ser distribuída entre os demais agentes do sistema) [12]. Por outro lado, não há uma compreensão completa sobre como controlar a emergência de um comportamento global por meio de interações locais simples, dificultando o projeto de um sistema deste tipo.

1.1.3 O estado da arte em vida artificial

A diversidade de aplicações da vida artificial é explicada pelos diferentes níveis em que o comportamento complexo e adaptativo é exibido. Análises deste comportamento podem ser realizadas em aplicações relacionadas a redes metabólicas e genômicas, células, organismos completos, grupos sociais, ecologias em evolução, sistemas computacionais e assim por diante. O estado da arte em vida artificial inclui aplicações e problemas em aberto em áreas como hierarquias dinâmicas, auto-organização no nível molecular, auto-replicação, criação de células artificiais, estudo da evolução do código genético, origem da multicelularidade, evolução da complexidade, capacidade de criação de novas adaptações pelo processo evolutivo, economias artificiais, evolução da linguagem, música, jogos e telecomunicações.

Além disso, a vida artificial inclui aplicações de maior relevância para o campo da ciência da computação, alguns dos quais brevemente descritos a seguir. Listas extensas de aplicações da vida artificial, tanto para a ciência da computação quanto para outras áreas de pesquisa podem ser encontradas em [5] e [27].

1.1.3.1 Robótica evolucionária

O campo da robótica evolucionária utiliza agentes autônomos com o objetivo de sintetizar um comportamento inteligente e adaptativo. O projeto tradicional de agentes autônomos inteligentes é dificultado por envolver sofisticadas interconexões entre diversos componentes complexos. A abordagem alternativa da vida artificial, inaugurada por Brooks [8] e detalhada mais recentemente em [48], é inspirar-se na natureza e utilizar um método de projeto evolucionário [11], geralmente por meio do emprego de

algoritmos genéticos [39]. Este método pode ser utilizado no projeto de diversos componentes de um robô, incluindo sistemas de controle e sensores. Em agentes autônomos naturais, o sistema de controle é fortemente ligado à morfologia, e tal interconexão foi sintetizada por Sims [58], na co-evolução do controle, sensores e morfologia de criaturas simuladas, e também abordada em estudos mais recentes [41, 42, 63].

1.1.3.2 Evolução de organismos digitais

O estudo de sistemas evolutivos em simulados por software é uma maneira prática de explorar hipóteses evolucionárias. O primeiro feito significativo relacionado à evolução espontânea em um meio digital foi o sistema Tierra [50]. Tierra consiste de uma população de “criaturas” digitais, programas simples auto-reprodutivos que povoam a memória do computador e consomem ciclos de CPU.

A simulação tem início quando um programa auto-reprodutivo ancestral é carregado, e inicia o processo de auto-reprodução. O processo repete-se, com a existência de erros, na forma de mutações, de maneira que a população em Tierra evolui por meio de seleção natural, com as criaturas mais antigas sendo removidas do sistema para criar espaço para novos descendentes. Se uma mutação permite a reprodução com maior velocidade, este genótipo tende a espalhar-se pela população.

Com o passar do tempo, a ecologia dos genótipos de Tierra torna-se diversa, produzindo parasitas que reproduzem-se rapidamente e exploram o código genético de hospedeiros. A co-evolução entre parasitas e hospedeiros leva à evolução da resistência a parasitas e a novas formas de parasitismo, e a ecologia em Tierra passa a exibir grande diversidade de criaturas e uma variedade de relações ecológicas cooperativas e competitivas.

1.1.3.3 Inteligência de enxame

A busca pelo projeto de algoritmos distribuídos inspirados pelo comportamento coletivo de sociedades de insetos veio a ser denominada “inteligência de enxame” (“*swarm intelligence*”).

Diversos organismos vivem em grupos sociais, e a vida artificial utiliza modelos *bottom-up* para explorar como a estrutura e o comportamento destes grupos surge

e é controlada. Os exemplos mais simples consideram a organização social de insetos. Redes distribuídas de insetos relativamente simples dão origem a comportamentos coletivos complexos, envolvendo busca por alimentos e transporte de recursos, entre outros [7]. Tais comportamentos coletivos são em geral notáveis por sua flexibilidade, robustez e autonomia.

Alguns avanços recentes relacionados à inteligência de enxame incluem o desenvolvimento de uma teoria matemática descrevendo o trabalho em grupo de robôs para atingir metas conjuntas [33], permitindo comparações quantitativas entre a teoria e experimentos envolvendo enxames de robôs, e a descrição formal de uma correspondência explícita entre alguns algoritmos de inteligência de enxame e algoritmos de gradiente estocástico, usados extensivamente em aprendizado de máquinas [38].

1.1.3.4 Computação gráfica

Os conceitos da vida artificial podem ser aplicados à construção de modelos gráficos para síntese de imagem, animação, multimídia e realidade virtual. A abordagem evolutiva da vida artificial pode representar uma grande diminuição no esforço necessário para especificar comportamentos e morfologias na criação de personagens e efeitos especiais.

O trabalho de Sims [58], mencionado acima, envolve criaturas que habitam um mundo simulado em três dimensões. Quando as evoluções simuladas são realizadas utilizando-se populações de criaturas que concorrem entre si, estratégias interessantes e diversas podem emergir. A pesquisa de Sims foi utilizada como base para o trabalho de outros autores [63, 44].

1.1.3.5 Modelagem de fenômenos naturais

A modelagem baseada em autômatos celulares, e a modelagem ecológica, como por exemplo aquela que procura representar o comportamento de cardumes de peixes ou de bandos de pássaros, são aplicações comuns da vida artificial.

Modelos simples de autômatos celulares oferecem métodos para a incorporação da modelagem computacional no estudo de fenômenos naturais. Três modelos de autômatos celulares associados a importantes fenômenos naturais foram propostos por

Malamud e Turcotte [36]: fogo em floresta, relacionado a incêndios, blocos deslizantes, relacionado a terremotos, e o modelo de montes de areia, relacionado a deslizamentos. Modelos computacionais de plantas vêm sendo considerados ferramentas úteis para compreender relações complexas entre função genética, fisiologia, desenvolvimento e a forma resultante das plantas [49].

Peixes artificiais são agentes autônomos cuja aparência e interações em grupo são fiéis aos peixes naturais. O modelo proposto por Terzopoulos e Tu [64] compreende não apenas a modelagem da forma e aparência dos peixes, mas também a leis da física que influenciam o seu comportamento e o seu ambiente, os meios de locomoção, a percepção do mundo e o seu comportamento.

O movimento agregado de bandos de pássaros, rebanhos de animais terrestres ou cardumes de peixes correspondem a fenômenos naturais familiares, mas cuja presença era raramente observada em computação gráfica, dada a complexidade do comportamento destes grupos de animais. Na década de 80, Reynolds desenvolveu uma abordagem que evitava a necessidade do detalhamento do caminho a ser percorrido por cada animal individualmente [54]. O movimento agregado passou a ser resultante de um modelo comportamental distribuído, onde o caminho a ser percorrido por cada agente era escolhido pelo próprio, com base em regras comportamentais simples. A análise do voo de bandos de pássaros em formação é também analisada por Lebar Bajec *et al.* [30, 31, 32], além de ser tema deste trabalho.

1.1.3.6 Internet e processamento de informação

A vida artificial pode ter um papel importante na rede mundial de computadores, como fonte de novos algoritmos e inspiração para seu futuro desenvolvimento [45]. Um modelo de busca de informação em uma coleção distribuída de documentos por agentes capazes de evoluir foi proposto por Menczer *et al.* [37]. Ao competir por documentos relevantes, os agentes adaptam-se ao seu ambiente, e são alocados para explorar eficientemente recursos distribuídos. O trabalho de Chao e Forrest [10] consiste na criação de um sistema imunológico artificial que elimina informações não desejadas antes que estas atinjam o usuário.

1.1.3.7 Eletrônica

Os trabalhos de Sipper [59] e Higuchi *et al.* [21] introduziram a noção de hardware capaz de evoluir (*evolvable hardware* – EHW). Ao contrário do hardware convencional, onde a estrutura torna-se imutável após o seu projeto, o EHW é projetado para adaptar-se a mudanças no ambiente ou nos requerimentos exigidos para a realização de tarefas, por meio de sua habilidade de reconfigurar sua própria estrutura dinamicamente de forma autônoma.

O projeto de filtros analógicos passivos com base em aplicações de algoritmos evolucionários foi tema do trabalho de Zebulum *et al.* [68].

Sistemas de inteligência de enxame simulando colônias de formigas foram empregados no problema do particionamento em projeto de circuitos VLSI [28] e na produção de geradores de números aleatórios capazes de evoluir [25].

Assim como na natureza, o espaço do hardware inspirado pela biologia pode ser particionado em três eixos: filogenia, ontogenia e epigênese. O trabalho de Stauffer *et al.* [62] apresenta brevemente três sistemas baseados em FPGAs, cada um deles situados ao longo de um diferente eixo deste modelo.

Ao procurar por presas, muitas espécies de predadores exibem o comportamento de, após capturá-las, iniciar uma busca restrita, procurando por capturas bem-sucedidas em áreas próximas. Em [34], Linhares propõe a síntese de uma estratégia de busca similar para a disposição da matriz de portas, um importante problema em arquitetura VLSI.

1.1.3.8 Segurança da informação

Motivados pela impossibilidade de lidar-se manualmente com a resposta a tentativas de invasão de computadores pela rede, e pela sobrecarga sofrida por sistemas automatizados ao capturar e classificar novos padrões de intrusão, Harmer *et al.* [19] desenvolveram um sistema imunológico artificial auto-adaptativo baseado em agentes distribuídos, utilizando estratégias inspiradas pela biologia. Similarmente, Aickelin *et al.* [2] propuseram o uso de sistemas de detecção de intrusão baseados nas teorias imunológicas mais recentes.

Os vírus de computador, desde o seu surgimento no início da década de 80, sempre

atraíram o interesse de cientistas, que questionavam-se sobre a possibilidade destes se tratarem de uma forma de vida artificial capaz de auto-replicação [60]. Similarmente à pesquisa realizada em torno de sistemas de detecção de intrusão, diversos esforços foram direcionados à criação de sistemas imunológicos para o combate a vírus de computador, como por exemplo em [26].

1.1.3.9 Mineração de dados

O uso da computação evolucionária em problemas de mineração de dados na área médica foi empregado por Ngan *et al.* [40], como base para seu algoritmo de busca e por Pena-Reyes e Sipper [47], que investigaram o uso de algoritmos evolucionários aplicados a problemas médicos como diagnóstico, prognósticos, processamento de sinais e planejamento.

Outros problemas relacionados à medicina foram abordados por meio de técnicas de vida artificial, como a predição da estrutura tridimensional em proteínas [9] e a inferência de redes regulatórias de genes em problemas de bioinformática [24].

Um algoritmo de mineração de dados baseado em colônias de formigas foi desenvolvido por Parpinelli *et al.* [46]. Abraham e Ramos [1] aplicaram algoritmos desta classe para busca de dados na *Web*.

1.1.4 Problemas em aberto

Os principais desafios e problemas em aberto da pesquisa em vida artificial foram listados por pesquisadores da área e classificados em uma lista dividida em três grandes questões: a transição para a vida, o potencial evolutivo da vida e a relação entre a vida, a mente e a cultura [6]. Embora estas questões não sejam diretamente relacionadas à ciência da computação, estando portanto omitidas aplicações diretas da vida artificial neste campo, como as descritas na seção anterior, a lista de problemas em aberto é interessante por ilustrar o aspecto amplo e multidisciplinar do estudo da vida artificial, e por citar alguns desafios que, embora genéricos, possuem magnitude grandiosa. Ela é resumida a seguir.

Como a vida surge a partir de sua ausência?

1. Gerar um proto-organismo *in vitro*.

2. Alcançar a transição à vida em uma química artificial *in silico*.
3. Determinar se novas organizações vivas podem surgir a partir de matéria inanimada.
4. Simular um organismo unicelular durante todo o seu ciclo de vida.
5. Explicar como regras e símbolos são gerados a partir da dinâmica física em sistemas vivos.

Quais são os potenciais e limites de sistemas vivos?

6. Determinar o que é inevitável na evolução da vida.
7. Determinar as condições mínimas para transições evolucionárias.
8. Criar uma estrutura formal para a síntese de hierarquias dinâmicas em todas as escalas.
9. Determinar a preditividade de manipulações evolucionárias de organismos e ecossistemas.
10. Desenvolver uma teoria de processamento de informação, fluxo de informação e geração de informação para sistemas em evolução.

Como a vida é relacionada à mente, máquinas e cultura

11. Demonstrar a emergência de inteligência e mente em um sistema de vida artificial.
12. Avaliar a influência das máquinas na próxima grande transição evolucionária da vida.
13. Prover um modelo quantitativo da relação entre as evoluções cultural e biológica.
14. Estabelecer os princípios éticos da vida artificial.



Figura 1.9: Um sapo reduz sua região de perigo movendo-se para uma região entre dois outros sapos.

1.2 O rebanho egoísta

No início da década de 1970, Hamilton hipotetizou sobre o comportamento de grupos de animais frente à ameaça de predadores. Imaginando um grupo de sapos às margens de um lago circular no qual habita uma cobra d'água, predadora dos sapos, Hamilton simulou o comportamento deste ecossistema assumindo as premissas de que os sapos movem-se apenas lateralmente ao longo das margens do lago (evitando assim aproximar-se da cobra d'água, dentro do lago, e de predadores terrestres afastando-se de suas margens), e que a cobra d'água ataca sempre o sapo mais próximo de si [18].

Considerando que os sapos estão inicialmente dispersos aleatoriamente ao longo da margem do lago, e que eles podem mover-se antes que a cobra d'água ataque, Hamilton argumenta que cada sapo terá uma maior chance de não ser o alvo mais próximo do predador se puder mover-se para uma região entre dois outros sapos, efetivamente diminuindo a sua “região de perigo”, como ilustrado na Figura 1.9.

Considerando que todos os sapos irão movimentar-se com o objetivo de reduzir a sua região de perigo, a observação do comportamento do conjunto ao longo do tempo demonstra que a movimentação leva à agregação dos sapos em grupos numerosos. Portanto, podemos afirmar que este modelo extremamente simples é uma indicação de que o comportamento egoísta assumido pelos sapos na tentativa de escapar de um predador leva à agregação do grupo.

Embora esta simulação ignore diversos aspectos de um sistema natural real, os resultados obtidos por meio dela são coerentes com as observações realizadas com diversas espécies de animais, como gaviões, ovelhas, peixes, e cervos, como descrito em maior detalhamento nas referências contidas em [18].

Hamilton batizou este comportamento de “rebanho egoísta”, como forma de enfatizar a motivação que cada membro do grupo em observação possui em tomar ações em benefício próprio, um comportamento que, indiretamente, pode levar a configurações

que beneficiem o grupo como um todo.

1.3 Roteiro do trabalho

Nos capítulos seguintes, será descrito o desenvolvimento de um modelo de vida artificial – a simulação do vôo em formação de pássaros artificiais – que busca proporcionar uma maior compreensão no que diz respeito aos fatores que levam à emergência deste fenômeno. O Capítulo 2 descreve estudos realizados no campo da biologia, que permitiram a formulação de hipóteses com o objetivo de identificar os fatores fundamentais para o vôo em formação de pássaros na natureza. Tais fatores serviram de inspiração para a criação do modelo aqui apresentado. Ainda neste capítulo, trabalhos relacionados à simulação do vôo de bandos de pássaros são analisados.

No Capítulo 3, é apresentado o algoritmo projetado para a simulação do vôo de pássaros de grande porte, para os quais a influência de efeitos aerodinâmicos gerados pela sua movimentação é significativa. Este capítulo é seguido pelos resultados obtidos com as simulações realizadas com este algoritmo, apresentados no Capítulo 4. De forma semelhante, o Capítulo 5 apresenta o algoritmo desenvolvido para simular o vôo em formação de pássaros de pequeno porte, para os quais o fator aerodinâmico pode ser considerado desprezível. No Capítulo 6, os resultados obtidos por meio de simulações realizadas com este algoritmo são apresentados.

O Capítulo 7 contém as considerações finais e conclusões sobre o trabalho, além de apresentar sugestões para extensões deste em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Formações de vôo de bandos de pássaros

Neste capítulo serão descritas as observações relacionadas ao comportamento de vôo em formação de bandos pássaros na natureza, sendo caracterizadas as principais propriedades deste fenômeno, bem como as hipóteses formuladas com o objetivo de explicá-lo. Tais hipóteses fornecem a motivação para a construção dos modelos de simulação aqui apresentados. Em seguida, um conjunto de trabalhos relacionados é descrito e analisado.

2.1 Hipóteses biológicas para o vôo em formação

Pássaros migratórios podem ser freqüentemente observados na natureza voando em formações semelhantes a um V, como a ilustrada na Figura 2.1. Em outras palavras, existe uma tendência de auto-organização do grupo em formações que possuem um pequeno número de líderes, ou seja, pássaros que estão à frente dos demais membros do bando, e que correspondem aos vértices de V's imaginários ao longo de cujas arestas os demais pássaros do bando tendem a se posicionar.

Entretanto, as formações observadas na natureza não se resumem apenas a formas que assemelham-se a V's. O trabalho de Heppner [20] cataloga as formações comumente observadas em grupos de pássaros em vôo coordenado. Algumas dessas formações são exibidas na Figura 2.2 e descritas abaixo.

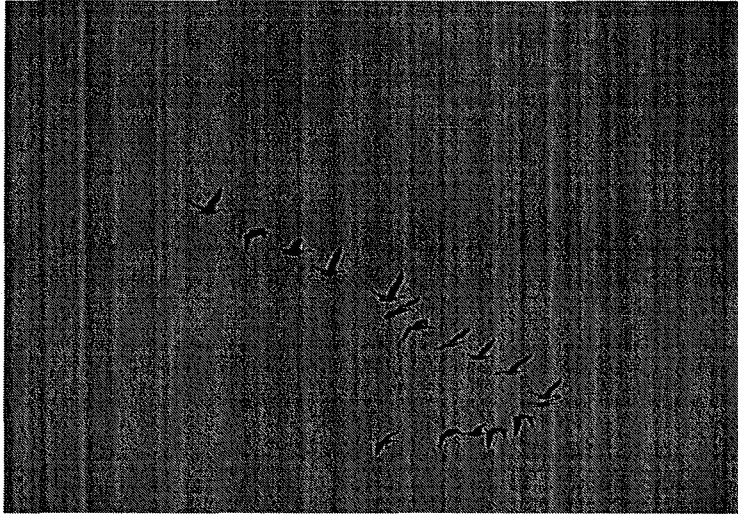


Figura 2.1: Pássaros voando em uma formação que assemelha-se a um V.

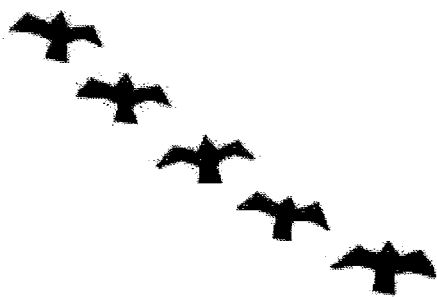
Escalão (Figura 2.2(a)): Pássaros nesta formação voam em uma única linha reta, seguindo uma inclinação que tem início a partir do líder do bando. Formações desse tipo podem ser observadas em aves marinhas de grande porte, como pelicanos e outras espécies costeiras.

V (Figura 2.2(b)) e J (Figura 2.2(c)): As formações em V e J são compostas por duas formações em escalão, com inclinações contrárias, unidas por suas extremidades frontais. Formações em V possuem aproximadamente o mesmo número de pássaros em cada aresta da formação, enquanto formações em J possuem arestas de tamanhos claramente diferentes. Estas formações são observadas comumente em aves marinhas e demais pássaros de grande porte.

V e J invertidos (Figuras 2.2(d) e 2.2(e)): Nas formações em V e J invertidos, o vértice da formação encontra-se na parte de trás do grupo. Em geral, formações desse tipo ocorrem durante períodos curtos de tempo, e correspondem a transições entre formações primárias.

V e J ramificados (Figura 2.2(f)): As formações ramificadas são exemplos de uma classe de formações na qual há uma ramificação secundária que surge a partir da formação principal.

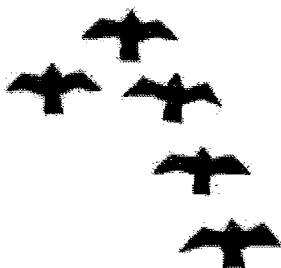
A análise do voo em formação de pássaros migratórios foi objeto de estudo de diversos trabalhos no campo da biologia, e embora pareça existir um consenso de que o



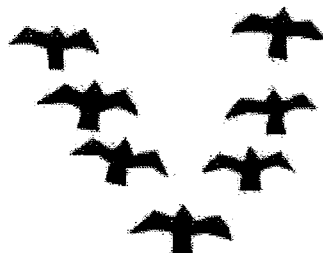
(a)



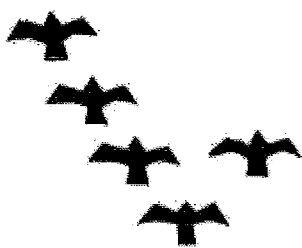
(b)



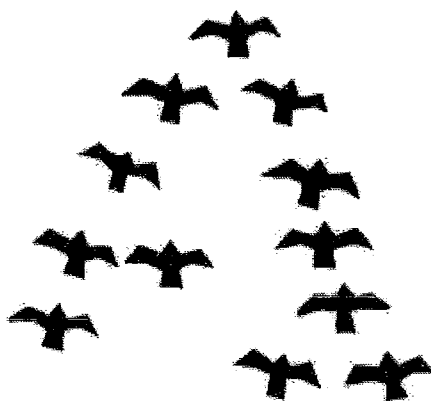
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2.2: Formações de vôo coordenado comumente observadas na natureza: escalão (a), V (b), J (c), V invertido (d), J invertido (e) e V ramificado (f).

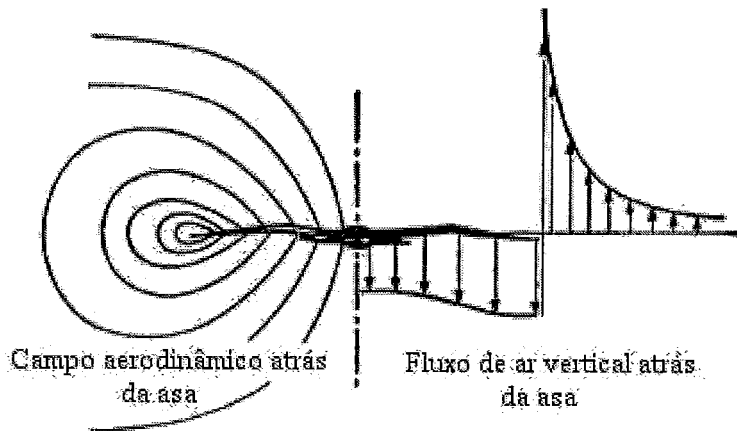


Figura 2.3: O campo aerodinâmico e o fluxo de ar vertical formado atrás das asas no modelo de Lissaman e Shollenberger.

vôo em grupo forneça maior proteção contra ataques de predadores [4], as razões pelas quais o agrupamento em vôo ocorre em formações semelhantes a um V são explicadas por duas hipóteses.

2.1.1 A hipótese da aerodinâmica

O trabalho pioneiro de Lissaman e Shollenberger [35] sugere, por meio de um modelo de asas fixas, que a formação de vôo em V melhora a eficiência aerodinâmica do bando. Em qualquer modelo aerodinâmico, um objeto imerso em um fluido, como por exemplo o ar, eleva-se gerando um momento descendente ao longo de sua extensão. Este fluxo de ar negativo faz com que, em contrapartida, cada pássaro em movimento produza uma região de fluxo de ar positivo a partir das regiões próximas às extremidades de suas asas, onde sua intensidade é maior, de forma que pássaros voando nesta região beneficiam-se por poderem realizar um esforço menor durante o vôo. O campo aerodinâmico e os fluxos de ar gerados pela movimentação dos pássaros é ilustrado na Figura 2.3.

Segundo o modelo de Lissaman e Shollenberger, um grupo de 25 pássaros voando lado a lado pode percorrer, em teoria, distâncias 70% maiores do que a percorrida por um pássaro em vôo solitário, com o mesmo consumo de energia. Embora este resultado seja válido para qualquer formação planar, a formação em V permite que o arrasto aerodinâmico seja uniformemente distribuído entre os membros do bando, beneficiando desta forma o grupo como um todo.

Diversos estudos posteriores parecem confirmar a motivação aerodinâmica para o

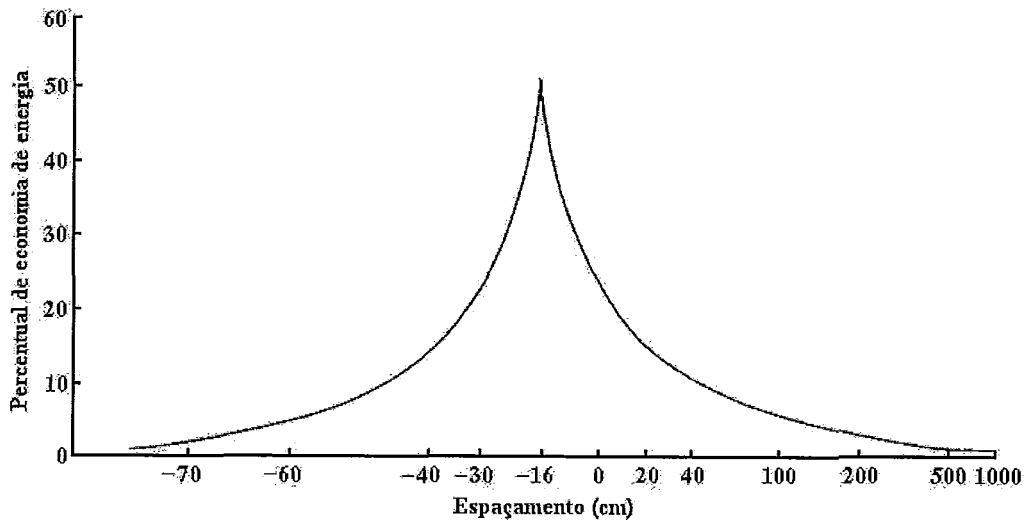


Figura 2.4: Economia de energia versus espaçamento entre as asas. O ganho decai rapidamente à medida em que a distância entre as pontas das asas afasta-se do seu ponto ótimo.

vôo em formação, em especial para pássaros de maior porte, para os quais os fluxos de ar gerados pelo seu movimento são mais significativos.

O trabalho de Hummel [22] confirma, por meio de métodos da aerodinâmica teórica, que existe uma redução na energia despendida durante o vôo para bandos na formação em V, e que esta é dependente do espaçamento lateral entre as asas de pássaros vizinhos. Segundo Hummel, o espaçamento longitudinal não influencia na quantidade total de energia poupada, embora atue na sua distribuição entre os membros do bando.

Em [17], Hainsworth observa a formação de vôo de gansos do Canadá, e conclui-se que existem ganhos reais de energia, embora estes sejam menores do que os previstos nos modelos teóricos. Nestes, o ganho de energia decai rapidamente à medida em que a distância entre as pontas das asas afasta-se do seu ponto ótimo, como ilustrado no gráfico da Figura 2.4, de forma que para que fossem obtidos ganhos máximos, seria necessário que os pássaros se posicionassem com extrema precisão. Este posicionamento preciso é, na prática, dificultado pelos constantes ajustes que necessariamente são realizados ao espaçamento durante o vôo, devido a mudanças de direção, variações no posicionamento de pássaros líderes e fatores ambientais como a presença de ventos. A energia poupada pelo vôo em formação dos gansos do Canadá, segundo Hainsworth, foi de cerca de 50% do valor previsto no modelo teórico de Lissaman e Shollenberger.

As observações de gansos bravos *Anser anser* realizadas por Speakman e Banks [61]

confirmam os resultados de Hainsworth, verificando experimentalmente a redução do consumo de energia no vôo em formação, com ganhos menores do que os previstos em modelos teóricos. De acordo com esta análise, a média do espaçamento ótimo entre as pontas das asas dos pássaros é bastante próxima do valor ótimo calculado por modelos teóricos, embora haja grande variação no seu posicionamento, e menos de 20% dos pássaros realmente tenham voado na posição ótima.

O trabalho de Weimerskirch *et al.* [66] consistiu na medição das taxas de batidas do coração de pelicanos brancos (*Pelecanus onocrotalus*) voando na formação em V. As observações indicaram que o vôo em formação permite uma redução na taxa de movimentação das asas dos pelicanos, permitindo-os planar por períodos de tempo mais extensos, o que por sua vez leva a uma redução na taxa de batidas do coração nos mesmos, quando comparadas às de pássaros em vôo solitário. Assim, conclui-se que o vôo em formação fornece uma redução significativa no esforço de vôo, permitindo aos pássaros que reduzam seus gastos de energia.

2.1.2 A hipótese da orientação visual

A segunda hipótese para as razões que levam à formação em V no vôo de bandos de pássaros é a de que este posicionamento é fundamental para a orientação dos mesmos, permitindo que haja comunicação visual sem obstruções.

Os estudos de Gould e Heppner [16] consistiram na observação da formação de vôo de gansos do Canadá em rotas levando a áreas de alimentação (em contraste com rotas migratórias). Segundo estas observações, houve grande variação no posicionamento dos pássaros, e em muitas situações as distâncias entre as extremidades das asas pareceu grande o suficiente para tornar inviável qualquer ganho aerodinâmico. Além disso, a formação em V foi observada com menor frequência em comparação a formações alternativas, como o vôo lado a lado.

Gould e Heppner observaram um grande número de formações claramente assimétricas, como as formações em escalão, e assim, questionando a hipótese de Lissaman e Shollenberger de que apenas formações em V ou J proporcionariam uma distribuição uniforme do arrasto aerodinâmico, argumentam que deve haver razões que não envolvam aspectos aerodinâmicos para explicar o vôo em formação, e sugerem que

o posicionamento em V possa ser resultado das necessidades visuais e espaciais dos pássaros, permitindo que cada pássaro veja os demais, e simultaneamente mantenha um campo de visão à frente desobstruído.

Para pássaros de menor porte, os benefícios aerodinâmicos parecem ser menos relevantes, e a hipótese da orientação visual é favorecida. Cutts e Speakman [13] fotografaram o vôo em formação de gansos de bico curto (*Anser brachyrhynchus*), e ganhos aerodinâmicos médios de apenas um terço do valor máximo teórico puderam ser observados. A grande variação na distância entre as extremidades das asas sugere que os pássaros têm dificuldade em manter o seu posicionamento, e voam em regiões externas ao posicionamento ótimo.

Além disso, Cutts e Speakman observaram neste trabalho uma forte correlação entre o espaçamento entre as extremidades das asas e o espaçamento longitudinal entre os pássaros. Este fator suporta a hipótese da orientação visual, onde cada pássaro posiciona-se de forma a obter maior conhecimento sobre o posicionamento dos demais membros do bando.

2.1.3 O modelo utilizado

Como pode ser observado, os dados obtidos através dos estudos da biologia são muitas vezes conflitantes, devido ao grande número de fatores que devem ser considerados na análise do vôo em formação. Por exemplo, dependendo do período do ano em que observações são realizadas, é possível que haja no bando em rota de migração um maior número de pássaros que estão realizando o seu primeiro vôo migratório, o que pode colocar um peso maior no fator social e de orientação visual para explicar o vôo em formação.

De fato, como observado por Badgerow [3] em análises acerca do vôo em formação de gansos do Canadá, algumas formações suportam a hipótese aerodinâmica, enquanto outras suportam a hipótese de orientação visual, e outras ainda suportam ambas as hipóteses simultaneamente. Entretanto, suas conclusões sugerem que o efeito aerodinâmico é mais significativo:

A dificuldade inerente da coordenação do vôo é composta pelos efeitos de turbulência e mudanças imprevisíveis na direção e velocidade do vento.

Tendo em vista estas restrições, o nível de variação no posicionamento foi surpreendentemente pequeno e implica em um grande esforço para maximizar as vantagens do vôo em formação. Eu sugiro que ambas as vantagens são obtidas, mas que prioridade é dada à redução do gasto de energia.

O debate entre as duas hipóteses é resumido por Rayner [51], que conclui que até o momento nenhuma delas foi capaz de explicar completamente o fenômeno de vôo em formação, embora existam evidências empíricas que suportam ambos os pontos de vista. Segundo Rayner,

É provável que os benefícios aerodinâmicos e sociais tenham co-evoluido para estabelecer este comportamento comum de vôo em pássaros de grande porte.

Seguindo esta observação, o modelo apresentado neste trabalho considera ambas as hipóteses – aerodinâmica e de orientação visual – para simular o vôo em formação de pássaros artificiais, e trata da questão da existência de regras de posicionamento que, inspiradas nestes fatores, levem o bando a formações semelhantes a V's. Tais regras, para serem realistas, devem ser inerentemente distribuídas, de forma que nenhum conhecimento da configuração global do bando pode ser assumido por parte de cada pássaro artificial. Assim, cada pássaro deve ser guiado apenas por informações sensoriais, motivadas pelos aspectos relevantes às duas hipóteses biológicas consideradas, e pelo desejo inato dos pássaros de voar em bando, como discutido acima.

No restante deste trabalho, será demonstrado que tais regras existem, tanto para pássaros de grande porte, onde a influência aerodinâmica é significativa, quanto para pássaros de menor porte, onde a motivação da orientação visual é predominante. Tais regras são simultaneamente robustas, no sentido de que levam a configurações globalmente estáveis, e flexíveis, pois permitem que uma vasta variedade de formações semelhantes a V's sejam alcançadas, como pode ser observado na natureza.

2.2 Trabalhos relacionados

O estudo realizado neste trabalho foi precedido por importantes contribuições sobre o mesmo tema e em linhas de pesquisa relacionadas. Em especial, deve ser destacado o

trabalho de Reynolds, pioneiro na busca por regras simples que expressem um comportamento realista obtido por meio de simulações do comportamento do movimento agregado em grupos de animais artificiais [54]. Por meio de tais regras comportamentais simples, Reynolds obteve em seus experimentos comportamentos globais elaborados e com bom grau de realismo, conforme descrito a seguir.

2.2.1 Os pássaros artificiais de Reynolds

Motivado pelo problema de descrever e controlar o movimento de bandos de pássaros em simulações no campo da animação computacional, Reynolds desenvolveu um modelo em que o comportamento de cada um dos pássaros é determinado por meio de suas interações com os demais membros do bando, respeitando um pequeno conjunto de regras simples. Este modelo torna desnecessária a descrição individual completa das rotas de movimento percorridas por cada pássaro no grupo, uma exigência dos métodos tradicionais de animação. Baseando-se apenas em decisões individuais de comportamento, ou seja, decisões tomadas por cada indivíduo com base em sua própria percepção do ambiente, o movimento em conjunto dos pássaros emerge como característica da interação entre os membros do bando.

Os bandos de pássaros artificiais de Reynolds, denominados *boids* (*bird droids*) são compostos por agentes distribuídos que obedecem a três regras simples de comportamento, listadas abaixo em ordem de precedência decrescente:

Regra 1 (Evitar colisões): não causar choques com pássaros próximos.

Regra 2 (Compatibilizar a velocidade): procurar manter a mesma velocidade de pássaros próximos.

Regra 3 (Centralização do bando): tentar manter-se próximo dos pássaros vizinhos.

Em sua essência, as regras de Reynolds tentam representar o equilíbrio entre duas motivações opostas: o desejo de cada pássaro de manter-se próximo ao bando, e o desejo de evitar colisões com outros pássaros.

Na Regra 1, a velocidade é uma grandeza vetorial, e refere-se à combinação de direção, sentido e magnitude. As Regras 1 e 2 são complementares, no sentido de que

expressam os desejos opostos mencionados acima. A Regra 2 funciona como uma versão preditiva da Regra 1, tendo em vista o fato de que se um pássaro consegue manter-se na mesma velocidade de seus vizinhos, é improvável que haverá colisões com algum destes. Desta forma, a Regra 1 tem como objetivo alcançar uma distância de separação mínima entre um pássaro e seus vizinhos, enquanto a Regra 2 tende a mantê-la.

A Regra 3 faz com que o pássaro tente manter-se no centro do bando. Como a percepção de cada *boïd* é limitada, isto significa na prática manter-se próximo à posição central dos pássaros vizinhos. Esta regra leva os pássaros localizados nas extremidades do bando a moverem-se para o seu centro, enquanto os pássaros que estão posicionados nas regiões centrais tendem a manter suas posições com menos variabilidade, tendo em vista que para estes, a densidade de vizinhos tende a ser mais homogênea.

Dado o comportamento observado em pássaros artificiais obedecendo às regras de Reynolds, como o ilustrado na Figura 2.5, cabe ressaltar que este modelo é, na realidade, mais fiel às ações de um cardume de peixes ou rebanho de gado do que ao comportamento de um bando de pássaros. Isto deve-se, em particular, às limitações impostas à percepção sensorial de cada agente. Esta característica adequa-se ao ambiente de peixes nadando em águas turvas, ou a animais movimentando-se como parte de um rebanho, que têm sua visão obstruída pela proximidade dos outros membros do grupo. Segundo Reynolds, o movimento coordenado de grupos (*flocking*) depende de uma visão local e limitada do ambiente.

Levando-se em conta as considerações acima, podemos considerar o modelo de Reynolds como um sistema genérico para a simulação do fenômeno de *flocking*. Desta forma, é natural que este não tenha como objetivo analisar as razões que levam às formações em V observadas em bandos de pássaros reais, ou mesmo alcançar especificamente tais configurações. Além disso, as regras idealizadas por Reynolds, embora compostas por instruções simples e intuitivas para guiar o comportamento dos pássaros artificiais, não são inspiradas pelas hipóteses formuladas no campo da biologia com base em observações de bandos de pássaros reais. Como exemplo, a conclusão de que uma visão local e limitada do ambiente por parte de cada membro do grupo é uma exigência para a existência do fenômeno da movimentação coordenada deste não parece de acordo com as condições reais em que ocorre o vôo em formação de bandos de pássaros, onde as condições de visão são, em geral, mais favoráveis do que aquelas



Figura 2.5: Movimento em grupo alcançado por pássaros artificiais obedecendo às regras de Reynolds. A formação do grupo assemelha-se mais fortemente a um cardume ou rebanho.

encontradas, por exemplo, por peixes em um cardume, embora obstruções visuais não possam ser totalmente descartadas.

Tais limitações neste modelo, portanto, constituem motivações para a busca de um conjunto de regras mais realista, inspirado pelas hipóteses atualmente aceitas por estudiosos do comportamento animal, e desta forma capaz de reproduzir com maior fidelidade o fenômeno das formações em V observadas na natureza.

2.2.2 Uma nova regra para os *boids*

Motivado pelo trabalho de Reynolds, Flake realizou alguns experimentos que simulam formações de vôo em bandos de pássaros [14]. Ao implementar as três regras de Reynolds, Flake não foi capaz de obter os resultados por ele desejados: reproduzir com os *boids* a emergência de formações similares àquelas que podem ser observadas na natureza. Em busca de uma simulação mais realista, Flake adicionou uma nova regra comportamental para dirigir o comportamento dos pássaros artificiais:

Regra 4 (Desobstruir a visão): manter o campo visual à frente desobstruído.

O modelo de Flake permite que cada regra seja priorizada com o uso de pesos que regulam a importância dada pelos pássaros artificiais a cada comportamento. As suas

simulações indicaram que para obter melhores resultados, a Regra 4 deve ser inserida após a Regra 1 de Reynolds, obedecendo o modelo de prioridades decrescentes. Com a adição da nova regra, Flake foi capaz de realizar simulações que levaram a resultados mais realistas, embora a emergência de formações em V não seja robusta neste modelo, no sentido de que não podem ser feitas garantias sobre a inclusão de todos os membros do bando nas formações alcançadas, ou mesmo afirmar-se que tais formações serão alcançadas em um número considerável de instâncias da simulação.

Estes resultados levam à ponderação sobre a existência de regras que tenham características semelhantes às de Reynolds e Flake, no sentido de serem inerentemente simples, locais e distribuídas, mas que simultaneamente possam ser mais realistas e robustas, buscando inspiração nas hipóteses biológicas para obter formações compatíveis com aquelas observadas na natureza.

2.2.3 *Boids* com pensamento fuzzy

O trabalho de Lebar Bajec *et al.* [30, 31, 32] explora a simulação de pássaros artificiais guiados por regras da lógica fuzzy. A hipótese básica consiste na suposta possibilidade de obter-se resultados comparáveis ou melhores do que os obtidos com a modelagem clássica do comportamento animal, por meio de simulações utilizando programação lingüística para a criação de regras baseadas no conhecimento comum, nem sempre claro, e por vezes contraditório, sobre o comportamento dos pássaros.

A construção de um modelo matemático preciso do comportamento animal constitui o principal problema neste tipo de simulação. Raramente o comportamento do animal em estudo é conhecido com exatidão, e em geral está disponível na forma de descrições e explicações lingüísticas do ponto de vista do seu observador. Assim, a transição de uma descrição em palavras para um modelo matemático raramente pode ser feita de forma direta e objetiva. Com o uso de regras baseadas na lógica fuzzy, Lebar Bajec *et al.* desejam eliminar esta transição, fornecendo a etologistas uma ferramenta para testes e formulação de hipóteses sobre o comportamento animal.

Segundo Lebar Bajec *et al.*, o conhecimento e as descrições sobre o comportamento animal são em geral incertos e ambíguos, o que torna a lógica fuzzy a ferramenta mais adequada para este tipo de descrição. O modelo proposto leva em consideração

três mecanismos que governam o movimento dos pássaros artificiais, que podem ser descritos como abaixo.

Mecanismo 1: Atração aos demais membros do bando.

1. Em geral, não modificar a velocidade ou direção de vôo;
2. Quando o vizinho estiver “próximo o suficiente”, não modificar a velocidade ou direção de vôo;
3. Quando o vizinho estiver “longe demais” e “à frente”, acelerar;
4. Quando o vizinho estiver “longe demais” e “à esquerda ou atrás”, virar na direção dele e diminuir a velocidade;
5. Quando o vizinho estiver “longe demais” e “à direita ou atrás”, virar na direção dele e diminuir a velocidade.

Mecanismo 2: Repulsão aos demais membros do bando;

1. Em geral, não modificar a velocidade ou direção de vôo;
2. Quando o vizinho estiver “longe o suficiente”, não modificar a velocidade ou direção de vôo;
3. Quando o vizinho estiver “perto demais” e “atrás”, acelerar;
4. Quando o vizinho estiver “perto demais” e “à frente ou à direita”, virar-se na direção oposta e diminuir a velocidade;
5. Quando o vizinho estiver “perto demais” e “à frente ou à esquerda”, virar-se na direção oposta e diminuir a velocidade.

Mecanismo 3: Polarização com os demais membros do bando.

1. Em geral, não modificar a velocidade ou direção de vôo;
2. Quando o vizinho estiver “longe demais” ou “perto demais”, não modificar a velocidade ou direção de vôo;
3. Quando o vizinho estiver a uma “boa” distância e voando na “mesma direção”, manter a direção de vôo;

4. Quando o vizinho estiver a uma “boa” distância, mas voando mais à “esquerda”, virar à esquerda;
5. Quando o vizinho estiver a uma “boa” distância, mas voando mais à “direita”, virar à direita;
6. Quando o vizinho estiver a uma “boa” distância e voando na “mesma velocidade”, manter a velocidade;
7. Quando o vizinho estiver a uma “boa” distância, mas voando “mais devagar”, diminuir a velocidade;
8. Quando o vizinho estiver a uma “boa” distância, mas voando “mais rápido”, acelerar.

O modelo proposto considera que cada pássaro pode perceber apenas um vizinho. O primeiro mecanismo consiste na mudança de velocidade de um pássaro no sentido de aproximar-se de seu vizinho; o segundo mecanismo leva um pássaro a afastar-se de vizinhos próximos demais; por fim, o terceiro mecanismo leva os pássaros a voarem em direções e velocidades próximas às de seus vizinhos.

As descrições empregadas para caracterizar o estado de um pássaro com relação aos seus vizinhos utilizam termos com significado impreciso, como “perto demais” ou “longe o suficiente”. O uso da lógica fuzzy permite que tais descrições imprecisas sejam aplicadas na determinação do comportamento dos pássaros artificiais.

Os três mecanismos empregados no modelo de Lebar Bajec *et al.* são em sua essência bastante semelhantes às regras projetadas por Reynolds, de forma que, como esperado, os resultados de suas simulações apresentaram grande semelhança aos obtidos por Reynolds, como pode ser observado nas Figuras 2.6 e 2.7. Assim, pode-se argumentar que este estudo permite a reprodução dos resultados obtidos em simulações anteriores, facilitando a transição de descrições lingüísticas que descrevam o comportamento observado na natureza para uma simulação computacional, sem a necessidade de um modelo matemático complexo que represente o sistema. Entretanto, não foram alcançadas, nestas simulações, formações de vôo mais realistas, similares às observadas na natureza, com exceção da evolução do sistema a partir de condições iniciais bastante específicas, como ilustrado na Figura 2.8.

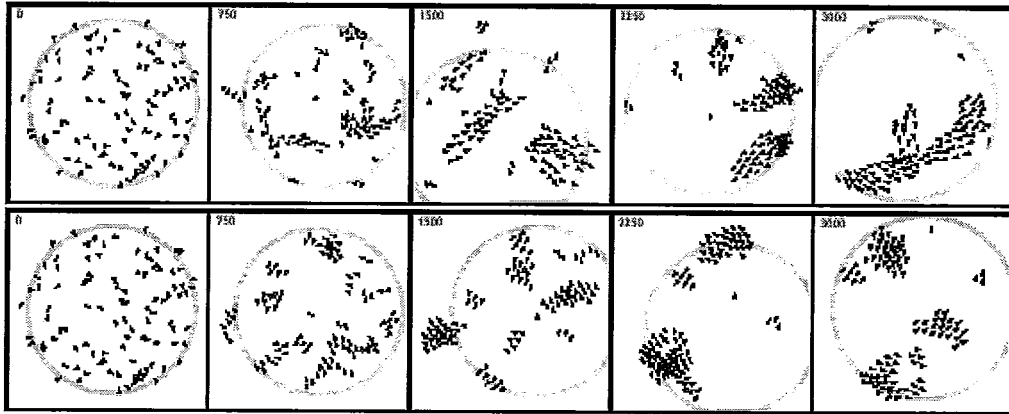


Figura 2.6: Comparação entre uma série de quadros equidistantes no tempo exibindo o comportamento de vôo em grupo no modelo de Reynolds (primeira linha) e do modelo fuzzy de Lebar Bajec *et al.* (segunda linha).

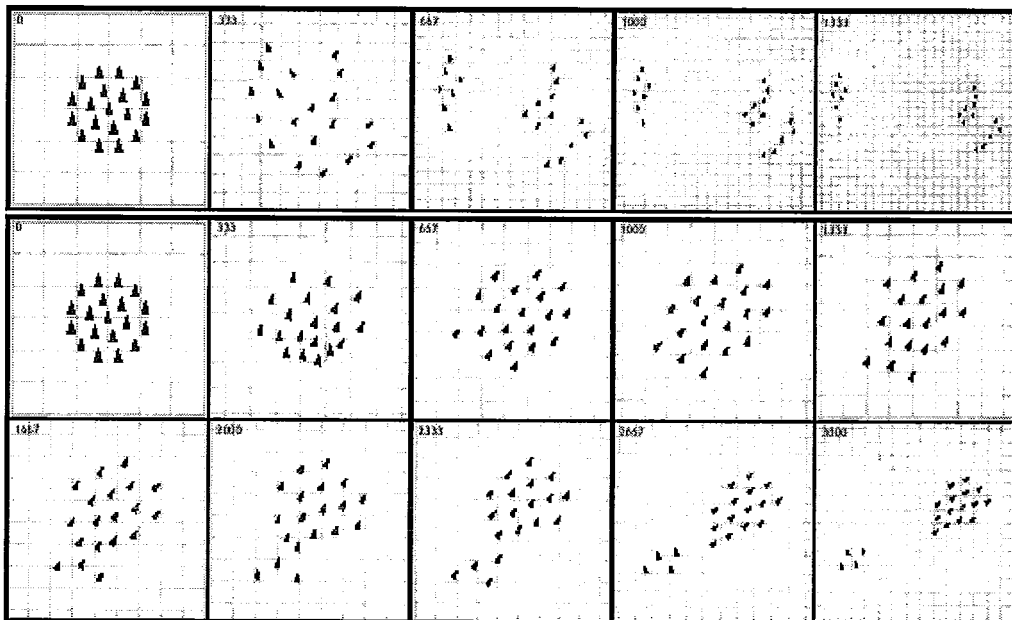


Figura 2.7: Comparação entre uma série de quadros equidistantes no tempo exibindo o comportamento de vôo a partir de um agrupamento circular. As primeira linha corresponde ao modelo de Reynolds, enquanto as demais correspondem ao modelo de Lebar Bajec *et al.*

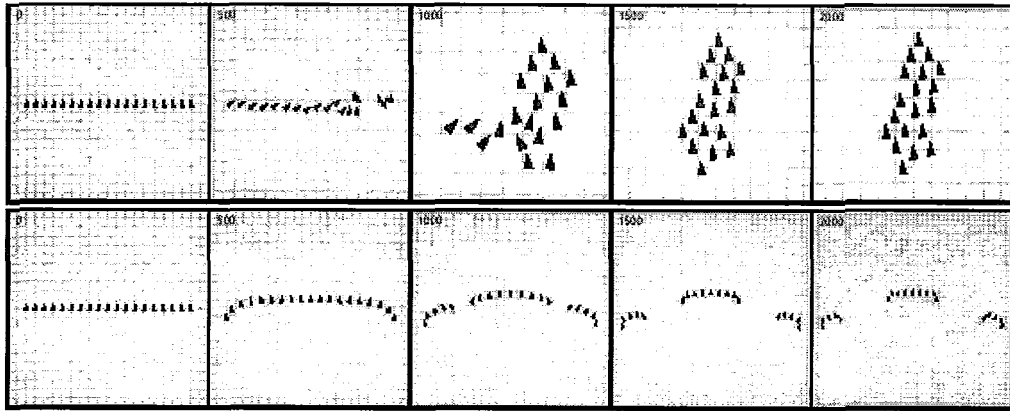


Figura 2.8: Comparação entre uma série de quadros equidistantes no tempo exibindo o comportamento de vôo a partir de uma formação em linha reta. A primeira linha corresponde ao modelo de Reynolds, e a segunda corresponde ao modelo de Lebar Bajec *et al.* Com estas condições iniciais, o modelo fuzzy apresentou um comportamento comparável a formações de vôo observadas na natureza.

Pode-se então conjecturar sobre a possibilidade da criação de regras que resultem em simulações realistas e que sejam independentes das condições iniciais da simulação, alcançando resultados satisfatórios mesmo que estas sejam aleatóreas.

Capítulo 3

Algoritmo para pássaros de grande porte

3.1 Introdução

Neste capítulo, será descrito o conjunto de regras concebido para realizar a simulação do vôo de pássaros artificiais em formações comumente observadas na natureza. Segundo as observações e estudos realizados no campo da biologia, a hipótese sobre o papel da influência aerodinâmica nas formações de vôo de bandos de pássaros faz-se presente mais concretamente quando estes possuem um maior porte. Neste caso, a envergadura de suas asas leva à geração de fluxos de ar significativos, o que permite que pássaros próximos, voando nas regiões onde tal fluxo seja positivo, beneficiem-se, e desta forma voem realizando menor esforço.

Como descrito em [51], há evidência da evolução conjunta das duas hipóteses existentes sobre as razões para o vôo em formação em bandos de pássaros, as já citadas hipóteses aerodinâmica e de orientação visual. Assim, com base nesta observação, foi concebido um conjunto de regras capaz de compor de maneira simples e sucinta os princípios a serem seguidos pelos pássaros e que parecem orientar o fenômeno da formação em V , quais sejam:

- Voar em grupo;
- Ter a visão desobstruída;

- Beneficiar-se das regiões de fluxo de ar positivo.

Podemos então listar o conjunto de regras que governa o comportamento dos pássaros artificiais e expressa a forma com a qual os princípios acima orientam as ações destes.

Regra 1 (regra de agrupamento): Aproximar-se do pássaro mais próximo, com o objetivo de unir-se ao bando.

Regra 2 (regra de busca de lacunas): Se a Regra 1 não mais se aplicar, buscar a região mais próxima que possibilite a desobstrução da visão longitudinal.

Regra 3 (regra de posicionamento): Aplicar a Regra 2 enquanto a desobstrução pretendida não for alcançada ou enquanto o esforço para manter-se no grupo estiver diminuindo.

As Regras 1 e 2 implicam na existência de uma distinção entre dois modos de comportamento, que ocorrem um em sucessão ao outro, ou em determinadas situações, alternadamente: os pássaros inicialmente buscam a proximidade do grupo, e posteriormente a desobstrução da sua visão. A movimentação dos pássaros em busca da desobstrução visual, de acordo com a Regra 2, pode resultar em novas aplicações da Regra 1 por parte dos pássaros que os seguem, com o objetivo de manter a sua proximidade com o restante do bando, e portanto as Regras 1 e 2 podem ser aplicadas alternadamente. As Regras 2 e 3 implicam que a influência sensorial no posicionamento dos pássaros é dada não apenas pela visão, mas também pelo esforço necessário para que estes mantenham-se unidos ao grupo, fator este relacionado aos fluxos de ar gerados por pássaros vizinhos.

Antes que uma descrição formal do algoritmo possa ser apresentada, é preciso esclarecer algumas especificações sobre as Regras 1–3. Em primeiro lugar, as Regras 1 e 2 implicitamente referem-se a uma região no espaço onde encontra-se algum alvo a ser seguido (o pássaro mais próximo, na Regra 1, e a posição mais próxima que permite visão desobstruída, na Regra 2). Em ambos os casos, assume-se que esta região é delimitada à esquerda e à direita, no plano do movimento, por um ângulo $\alpha/2$. Além disso, considera-se que $\alpha \leq 180^\circ$. Embora o campo de visão de diversas espécies de

pássaros seja delimitado por ângulos maiores, considera-se aqui que o ângulo α não corresponde ao campo visual, mas à região onde o pássaro busca as informações sensoriais necessárias à aplicação das Regras 1 e 2.

De maneira semelhante, as Regras 1 e 3 referem-se, também implicitamente, à existência de uma região fechada em torno de cada pássaro, dentro da qual a proximidade é alcançada (Regra 1) ou fluxos de ar positivos são encontrados (Regra 3). Dados os limites mencionados anteriormente com relação a α , assume-se que esta região tenha a forma descrita na Figura 3.1, onde um pássaro artificial é representado por um círculo preenchido (seu corpo) e dois segmentos de reta horizontais (suas asas).

Seja j um pássaro que busca aproximar-se do pássaro mais próximo de si, digamos i , seguindo as ações da Regra 1. Então, tal proximidade é atingida quando alguma parte do corpo ou das asas de j pertencer a $U_i^- \cup D_i \cup U_i^+$. Para encontrar a região de fluxo de ar positivo, de acordo com a Regra 3, é necessário que alguma parte do corpo ou das asas de j faça interseção com $U_i^- \cup U_i^+$ e, simultaneamente, que não haja interseção de qualquer parte do corpo ou asas de j com D_i .

Quando j encontra-se na região de fluxo de ar positivo de i , respeitando as restrições de posicionamento citadas acima, considera-se que o posicionamento ótimo de j em relação a i , ou seja, a distância em que a magnitude de tal fluxo é máxima, é de $\lambda = (\pi/4 - 1)w/2 \approx -0.1073w$ [22, 23, 56], onde w representa a envergadura de cada pássaro. Acredita-se que a distância longitudinal entre dois pássaros na região $U_i^- \cup D_i \cup U_i^+$ é irrelevante para a obtenção do fluxo de ar positivo máximo, como citado anteriormente e discutido por diversos autores [35, 22, 56]. Assim, para que j alcance o posicionamento ótimo com relação a i , é necessário que haja uma sobreposição lateral entre as asas dos dois pássaros.

O algoritmo detalhado a seguir corresponde a uma descrição formal das Regras 1–3 listadas acima, e inclui observações sobre o comportamento dos pássaros artificiais em situações que não estão diretamente relacionadas à obtenção da formação de vôo em V , como por exemplo as ações tomadas para que colisões com pássaros vizinhos sejam evitadas.

Considera-se que os pássaros voam em um plano infinito, movendo-se na direção do eixo y . Assume-se que todos os pássaros artificiais envolvidos na simulação são iguais, e portanto possuem os mesmos valores para os atributos de velocidade, deslocamento

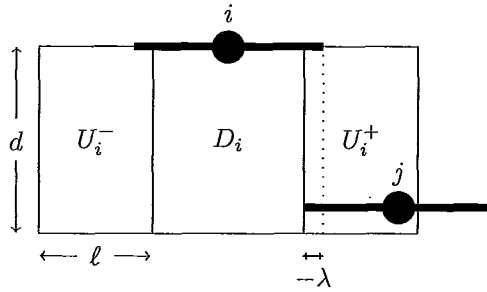


Figura 3.1: As regiões de fluxo de ar positivo (U_i^- e U_i^+) e negativo (D_i) do pássaro i em voo. O pássaro j está posicionado de maneira a obter uma redução máxima no esforço de voo.

lateral, ângulo de busca, envergadura, região de influência aerodinâmica, tamanho do corpo e espaçamento lateral ótimo, embora seja relevante observar que os deslocamentos realizados pelos pássaros podem sofrer variações sob certas condições, descritas posteriormente. Além disso, nenhum tipo de conhecimento global é utilizado pelos pássaros para alcançar o voo em formação. Cada um deles possui apenas conhecimento sobre o posicionamento de seus vizinhos, limitado pelo ângulo de busca, e escolhe suas ações de acordo com as regras e objetivos descritos acima, buscando apenas o próprio benefício ao modificar o seu posicionamento relativo aos demais membros do bando. Dada esta última observação, pode-se dizer que este modelo de comportamento corresponde a um “rebanho egoísta” como definido em [18].

3.2 Definições

Considere as definições abaixo. Sejam:

- \mathcal{F} o conjunto de pássaros i , $i = 1, \dots, n$.
- α o “ângulo de busca” de um pássaro, onde $\alpha \leq 180^\circ$.
- $\mathcal{S}_i(t) \subseteq \mathcal{F}$ o conjunto de pássaros cobertos pelo ângulo de busca do pássaro i no instante de tempo t .
- $d_{ij}^x(t)$ e $d_{ij}^y(t)$ as distâncias nas direções dos eixos x e y , respectivamente, do pássaro i ao pássaro j no instante de tempo t , medidas de acordo com a Figura 3.2.

- $d_{ij}(t)$ a distância do pássaro i ao pássaro j no instante de tempo t , com componentes nos eixos horizontal e vertical iguais a $d_{ij}^x(t)$ e $d_{ij}^y(t)$, respectivamente, ou seja,

$$[d_{ij}(t)]^2 = [d_{ij}^x(t)]^2 + [d_{ij}^y(t)]^2. \quad (3.1)$$

- Δx e Δy os deslocamentos base que um pássaro pode sofrer na sua posição nas direções dos eixo x e y , respectivamente, em um intervalo de tempo.
- δy o acréscimo à variação na posição de um pássaro na direção do eixo y devido a uma mudança de velocidade.
- $x_i(t)$ e $y_i(t)$ as posições do pássaro i com relação aos eixos x e y , respectivamente, no instante de tempo t , como ilustrado na Figura 3.2.
- w a envergadura dos pássaros.
- ϵ o diâmetro do corpo dos pássaros.
- ℓ e d as distâncias horizontal e vertical, respectivamente, que delimitam os fluxos de ar positivos, associadas a cada pássaro, como ilustrado na Figura 3.1.
- λ o espaçamento horizontal ótimo entre dois pássaros, para o qual o benefício aerodinâmico fornecido pelo fluxo de ar positivo é máximo, como ilustrado na Figura 3.1.
- U_i^- e U_i^+ as regiões de fluxo de ar positivo associadas ao pássaro i , existentes à sua esquerda e à sua direita, respectivamente. Dado um pássaro j , diz-se que $j \in U_i^-$ no instante t se

$$\begin{cases} y_j(t) < y_i(t) \\ x_j(t) < x_i(t) \\ d_{ji}^y(t) \leq d \\ w + \lambda \leq d_{ji}^x(t) \leq w + \lambda + \ell \end{cases} \quad (3.2)$$

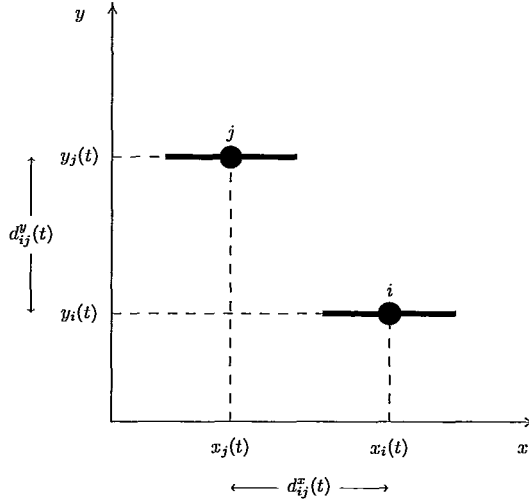


Figura 3.2: As coordenadas dos pássaros i e j , bem como as distâncias entre eles, são medidas com relação ao centro do círculo correspondente aos seus corpos.

Analogamente, pode-se dizer que $j \in U_i^+$ no instante t se

$$\begin{cases} y_j(t) < y_i(t) \\ x_j(t) > x_i(t) \\ d_{ji}^y(t) \leq d \\ w + \lambda \leq d_{ji}^x(t) \leq w + \lambda + \ell \end{cases} \quad (3.3)$$

- D_i a região de fluxo de ar negativo associada ao pássaro i . Dado um pássaro j , dizemos que $j \in D_i$ se

$$\begin{cases} y_j(t) < y_i(t) \\ d_{ji}^y(t) \leq d \\ d_{ji}^x(t) \leq w + \lambda \end{cases} \quad (3.4)$$

3.3 O algoritmo

A descrição a seguir, em conjunto com o procedimento descrito no Algoritmo 1, corresponde a uma definição formal das regras de posicionamento obedecidas pelos pássaros artificiais.

O algoritmo tem início com um teste que indica se o pássaro i é um líder no bando, o que é determinado pelo conjunto $S_i(t)$. Se $S_i(t) = \emptyset$, então i é um líder, e sua única ação é continuar movendo-se à velocidade padrão na direção do eixo y .

Algoritmo 1 Algoritmo para o pássaro i no intervalo de tempo t

```
1: Se  $\mathcal{S}_i(t) = \emptyset$  então
2:    $y_i(t) := y_i(t) + \Delta y$ 
3: Senão
4:   Se  $\exists j$  tal que  $i \in U_j^- \cup D_j \cup U_j^+$  então
5:     Se  $d_{ij}^x - w \neq \lambda$  e houver lacunas visíveis a  $i$  então
6:       Seja  $\Delta x_i(t) = \pm \min \{ \Delta x, |d_{ij}^x - w - \lambda| \}$ , com sinal determinado pela regra
       de busca de lacunas.
7:       Se o acréscimo de  $\Delta x_i(t)$  a  $x_i(t)$  não causar uma colisão então
8:          $x_i(t) := x_i(t) + \Delta x_i(t)$ 
9:       Senão
10:        Seja  $\Delta y_i(t) = \pm \delta y$  com sinal determinado aleatoriamente.
11:        Se o acréscimo de  $\Delta y_i(t)$  a  $y_i(t)$  não causar uma colisão então
12:           $y_i(t) := y_i(t) + \Delta y + \Delta y_i(t)$ 
13:      Senão
14:        Seja  $j \in \mathcal{S}_i(t)$  tal que  $j = \arg \min_{k \in \mathcal{S}_i(t)} \{ d_{ik}(t) \}$ .
15:         $y_i(t) := y_i(t) + \Delta y + \delta y$ 
16:        Se  $x_i(t) < x_j(t) - w$  então
17:           $x_i(t) := x_i(t) + \Delta x$ 
18:        Senão se  $x_i(t) > x_j(t) + w$  então
19:           $x_i(t) := x_i(t) - \Delta x$ 
```

Caso contrário, se i pertence à região de influência aerodinâmica de algum pássaro j , se a sua posição não é a de redução máxima do esforço de vôo, e se há ao menos uma lacuna visível, de acordo com as definições de lacunas e de visibilidade destas da Seção 3.3.1, abaixo, como determinado pelos testes nas linhas 4 e 5, então i calcula, na linha 6, o sentido do movimento lateral a ser realizado, como indicado pela regra de busca de lacunas, discutida na mesma seção, e a sua magnitude, de acordo com as considerações da Seção 3.3.2. Este movimento é realizado apenas se não for ocasionar uma colisão com algum pássaro vizinho (linhas 7 e 8), de acordo com o mecanismo de detecção de colisões discutido na Seção 3.4.2. Se uma colisão for possível, i escolhe aleatoriamente entre acelerar ou reduzir sua velocidade, e realiza este movimento apenas se o mesmo não proporcionar também uma colisão, permanecendo na mesma posição em caso contrário (linhas 9–12).

Se i não estiver na região de influência aerodinâmica de algum outro membro do bando, então ele busca aproximar-se do pássaro mais próximo de si que seja coberto pelo seu ângulo de busca, como determinado na linha 14, acelerando (linha 15), e movendo-se lateralmente no sentido apropriado, caso necessário (linhas 16–19).

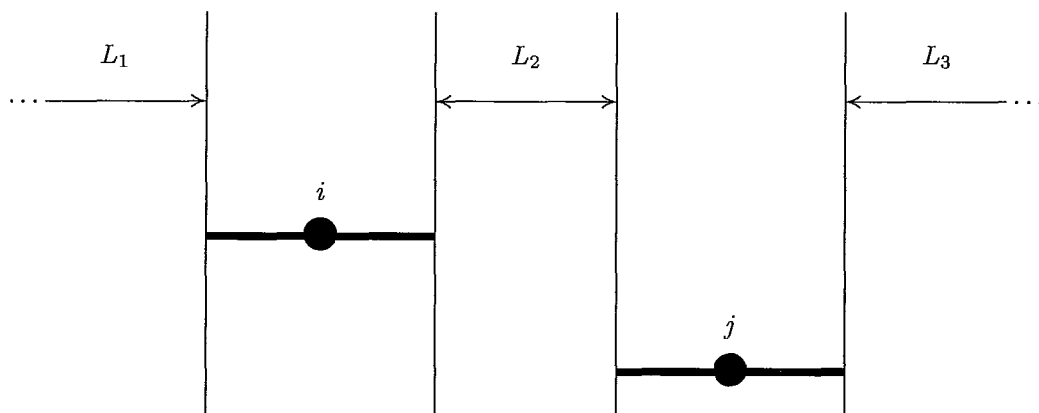


Figura 3.3: Lacunas maximais. As lacunas L_1 e L_3 são delimitadas, respectivamente, pela extremidade da asa esquerda de i e pela extremidade da asa direita de j , e têm largura infinita. A lacuna L_2 é delimitada pela extremidade da asa direita de i e pela extremidade da asa esquerda de j , e portanto tem sua largura definida pela distância horizontal entre as duas extremidades.

3.3.1 Regra de busca de lacunas

Define-se uma lacuna como qualquer extensão lateral que não contém a coordenada na direção do eixo x de nenhuma porção do corpo ou asa de qualquer pássaro. Um lacuna é dita maximal se não estiver contida em qualquer outra lacuna. Em outras palavras, uma lacuna maximal pode ser delimitada pelas extremidades das asas de dois pássaros, uma à esquerda e outra à direita, ou apenas pela extremidade de uma das asas de um pássaro, tendo portanto largura infinita. Lacunas maximais, desta forma, podem ser interpretadas como faixas longitudinais de espaço vazio, cada uma delimitada pela extremidade de uma das asas de algum pássaro em ao menos um dos lados, conforme ilustrado na Figura 3.3.

Seja $\mathcal{G}(t)$ o conjunto de lacunas maximais de largura maior ou igual a $w + 2\lambda$ no instante t . Esta é a extensão lateral mínima para que um pássaro possa posicionar-se em uma lacuna sem sofrer os efeitos do fluxo de ar negativo dos pássaros que delimitam a lacuna, e inclui as duas lacunas externas, de largura infinita, delimitadas apenas em um dos lados pela extremidade de uma das asas de um pássaro. Seja ainda j um dos pássaros que delimite com uma de suas asas uma lacuna maximal L em $\mathcal{G}(t)$, e suponha que j seja, dentre os pássaros que delimitam esta lacuna, aquele mais próximo do pássaro i . Em outras palavras, L é delimitada pelas extremidades das asas de dois pássaros j e k , e $d_{ij}(t) < d_{ik}(t)$, ou L é delimitada apenas por uma das asas de j

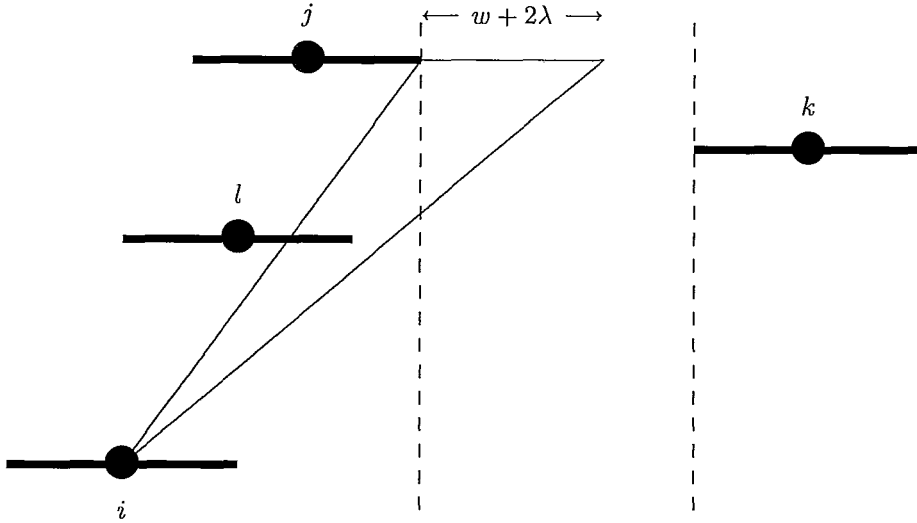


Figura 3.4: O cone de visão do pássaro i , correspondente à lacuna entre as extremidades das asas dos pássaros j e k . Esta lacuna não é visível para i pois parte de uma das asas do pássaro l está contida na região delimitada por seu cone de visão.

e possui largura infinita. Considere agora o cone com um vértice em $(x_i(t), y_i(t))$ e demais vértices em $(x_j(t) + \frac{w}{2}, y_j(t))$ e $(x_j(t) + \frac{3}{2}w + 2\lambda, y_j(t))$, se a extremidade da asa direita de j delimita L à esquerda ou $(x_j(t) - \frac{3}{2}w - 2\lambda, y_j(t))$ e $(x_j(t) - \frac{w}{2}, y_j(t))$, se a extremidade da asa esquerda de j delimita L à direita. A lacuna L é dita *visível* por i se a área deste cone não contiver nenhuma parte do corpo ou das asas de qualquer outro pássaro em $\mathcal{S}_i(t)$. A Figura 3.4 ilustra uma lacuna obstruída.

Seja então $\mathcal{G}_i(t)$ o conjunto das lacunas visíveis a i no intervalo de tempo t , e considere as posições correspondentes às extremidades das asas dos pássaros que compõem tais lacunas. Estas são as posições que delimitam as lacunas em $\mathcal{G}_i(t)$. A regra de busca de lacunas indica que, se $\mathcal{G}_i(t) \neq \emptyset$, i deve mover-se ao longo do eixo x no sentido de aproximar-se da posição da extremidade de asa mais próxima de sua posição atual, $x_i(t)$. Caso contrário, i não deve mover-se lateralmente no intervalo de tempo t .

3.3.2 Deslocamentos laterais

O algoritmo define a magnitude do deslocamento lateral de pássaros pertencentes ao bando que buscam pelo posicionamento ótimo como

$$\min\{\Delta x, |d_{ij}^x - w - \lambda|\}. \quad (3.5)$$

Esta definição evita movimentos oscilatórios nas proximidades do ponto de redução máxima do esforço de vôo, que seriam resultantes de um deslocamento fixo na direção do eixo x . Com a magnitude definida como o valor mínimo entre o deslocamento base e a distância a ser percorrida até o ponto de esforço mínimo, na direção do eixo x , este comportamento oscilatório é evitado.

Alternativamente, uma redução na ocorrência do comportamento oscilatório poderia ser alcançada por meio da diminuição do valor do parâmetro Δx . Para que tal comportamento fosse eliminado com esta solução, seria necessária a atribuição da menor unidade de deslocamento possível a este parâmetro, de forma que o movimento lateral não possa ultrapassar o ponto ótimo a ser atingido.

Uma maneira de obter-se maior realismo na definição do valor da magnitude do deslocamento lateral é realizar o seu cálculo com base em um coeficiente de memória, μ , da seguinte forma:

$$\Delta x_i(t) = \mu \Delta x_i(t-1) + (1 - \mu) \Delta x \quad (3.6)$$

onde $\Delta x_i(t)$ corresponde à magnitude do movimento lateral do pássaro i no intervalo de tempo t , e seu sinal define o sentido deste movimento. Com o uso do coeficiente de memória, o cálculo da magnitude passa a depender dos valores calculados em turnos anteriores, e as oscilações no movimento lateral passam a ter amplitudes progressivamente menores, até que seja alcançado o valor necessário para posicionar o pássaro no ponto de ganho aerodinâmico máximo.

Embora o coeficiente de memória μ tenha sido implementado para a realização das simulações, foi observado que o seu uso não leva a modificações significativas em termos globais nos comportamentos apresentados pelos bandos de pássaros em formação, e por isso nos resultados apresentados no Capítulo 4, não foi utilizado este coeficiente, o que corresponde a fazer $\mu = 0$ na Equação 3.6.

3.4 Comentários sobre o algoritmo

3.4.1 Decisões locais

Como mencionado anteriormente, o algoritmo de busca de lacunas recorre apenas a informações sensoriais para que cada pássaro tome suas decisões com relação ao seu posicionamento. Assim, os pássaros artificiais não possuem qualquer conhecimento sobre o estabelecimento de qualquer tipo de formação global de vôo que venha a ser alcançada pelo bando, e buscam apenas obter um maior benefício para si próprios no que diz respeito aos princípios e regras de comportamento detalhadas acima.

3.4.2 Tratamento de colisões

O tratamento de colisões foi implementado de maneira extremamente simples no algoritmo, recorrendo a uma decisão aleatória de aceleração ou redução da velocidade quando uma colisão iminente é detectada. A motivação para a mudança de velocidade é dar ao pássaro artificial a possibilidade de “escapar” de uma região onde seu movimento lateral esteja obstruído por pássaros próximos, e o fato de que a decisão é tomada aleatoriamente a cada turno pode levar a oscilações no movimento até que o pássaro tenha novamente espaço suficiente para movimentar-se.

Embora este comportamento de oscilação entre aceleração e redução de velocidade não possa ser considerado realista, o ato de evitar colisões é uma ação meramente circunstancial executada pelos pássaros, e que não possui qualquer influência na formação de vôo alcançada pelo grupo. Assim, mesmo sendo possível conceber um comportamento mais complexo e realista nesse aspecto, foi escolhida a solução de implementação mais simples, por tratar-se de uma questão secundária considerando-se os objetivos do trabalho.

Para detectar-se uma colisão, considera-se que um pássaro i corresponde a um retângulo de largura dada pela sua envergadura, w , e altura dada pelo diâmetro do seu corpo, ϵ , com centro em $(x_i(t), y_i(t))$. Se o movimento de qualquer outro pássaro levar a uma interseção de seu corpo ou asas com a área delimitada por este retângulo, assume-se a ocorrência de uma colisão.

3.4.3 Estabilidade das formações

Um pássaro artificial é dito estável se, após um determinado intervalo de tempo t_e , os únicos movimentos realizados por ele são aqueles na direção do eixo y , e de magnitude Δy . Matematicamente, diz-se que i está em equilíbrio a partir do intervalo de tempo t_e se $\exists t_e$ tal que

$$\Delta x_i(t) = 0 \quad \text{e} \quad \Delta y_i(t) = \Delta y \quad \forall t > t_e \quad (3.7)$$

onde $\Delta x_i(t)$ e $\Delta y_i(t)$ são as magnitudes dos movimentos realizados pelo pássaro i , na direção dos eixos x e y , respectivamente, no instante de tempo t .

Seja \mathcal{E} o conjunto de pássaros estáveis em um bando. Uma formação de pássaros é dita estável se todos os membros do bando forem estáveis, ou seja,

$$i \in \mathcal{E} \quad \forall i \in \mathcal{F}. \quad (3.8)$$

O algoritmo de busca de lacunas descrito acima pode fazer algumas garantias quanto à estabilidade das formações alcançadas, de acordo com o valor do ângulo de busca α utilizado nas simulações. Para $\alpha = 180^\circ$, as formações resultantes da execução do algoritmo sempre serão estáveis. Isto deve-se ao fato de que para este valor de α , um pássaro i tem todos os pássaros j tais que $y_j(t) > y_i(t)$ cobertos pelo ângulo de busca, o que significa que um deslocamento lateral realizado por i na direção do eixo x não modifica o conjunto de pássaros $\mathcal{S}_i(t)$, e portanto a escolha da lacuna mais próxima não é afetada.

Por outro lado, se $\alpha < 180^\circ$, o conjunto de pássaros cobertos pelo ângulo de busca, $\mathcal{S}_i(t)$, pode ser afetado por deslocamentos ao longo do eixo x , como ilustrado na Figura 3.5. Isto implica em possíveis modificações em $\mathcal{G}_i(t)$, o que pode levar a um comportamento de movimento lateral oscilatório, ou seja, à alternância no sentido do deslocamento lateral a cada instante de tempo. A implementação não toma qualquer ação no sentido de impedir o comportamento instável. Embora seja simples implementar alguma medida que impeça as oscilações, decidiu-se que ações dessa natureza seriam necessariamente arbitrárias, e não inspiradas pelo comportamento de pássaros reais, de forma que a ocorrência de instabilidade nas formações, quando existente, é

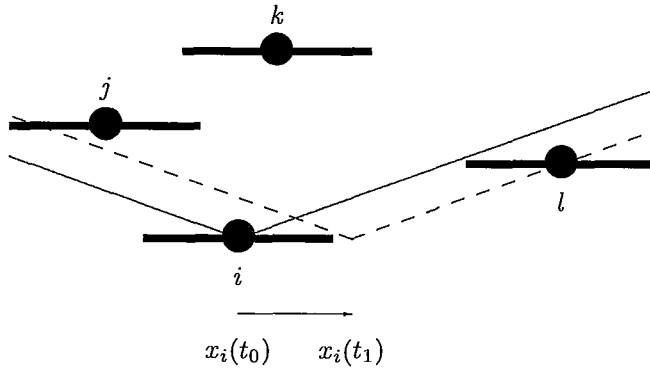


Figura 3.5: No instante t_0 , i encontra-se na posição $x_i(t_0)$ no eixo x , e $\mathcal{S}_i(t_0) = \{j, k\}$. Portanto, i identifica como lacuna mais próxima de si a lacuna delimitada à esquerda pela extremidade da asa direita de k , e de comprimento infinito. Ao mover-se lateralmente no instante t_1 para $x_i(t_1)$, $\mathcal{S}_i(t_1) = \mathcal{S}_i(t_0) + l$, e assim a lacuna-alvo de i passa a ser delimitada à direita pela extremidade da asa esquerda de l . Com isso, a lacuna passa a não possuir a largura mínima de $w + 2\lambda$ necessária para pertencer a $\mathcal{G}_i(t)$, e então a nova lacuna mais próxima de i passa a ser aquela delimitada à direita pela extremidade da asa esquerda do pássaro j , fazendo com que no próximo instante de tempo, t_3 , $x_i(t_3) = x_i(t_0)$. Se os pássaros j , k e l estiverem estáveis, então i permanecerá alternando sua posição, em um comportamento oscilatório que ocorrerá indefinidamente. Na figura, o deslocamento lateral de i aparece fora de escala para facilitar a visualização das condições que levam a este comportamento.

permitida e relatada nos resultados da simulação.

Capítulo 4

Resultados da simulação para pássaros de grande porte

4.1 Introdução

O algoritmo de simulação opera sobre n pássaros artificiais e é executado durante T intervalos de tempo. Inicialmente, os pássaros estão posicionados aleatoriamente dentro de um quadrado de dimensões unitárias, cujos lados são paralelos às direções dos eixos x e y , conforme ilustrado na Figura 4.1. Com a exceção dos ocasionais deslocamentos relativos aos demais membros do bando que um pássaro deve realizar para mover-se de acordo com as Regras 1–3, considera-se que os pássaros não possuem velocidade lateral, e que todos movimentam-se longitudinalmente à mesma velocidade. Desta forma, os deslocamentos são implementados por meio da adição ou subtração dos valores Δx (deslocamento lateral) e Δy (deslocamento longitudinal), como descrito nas definições introduzidas na Seção 3.2, e levando-se em consideração as observações sobre as possíveis variações sofridas por estes deslocamentos lá realizadas.

O quadrado de dimensões unitárias citado anteriormente não limita a região de vôo dos pássaros artificiais, embora pela Regra 1 seja razoável esperar que exista um quadrado de dimensões fixas que, a cada intervalo de tempo, contenha todos os pássaros. Desta forma, pode-se considerar que os pássaros habitem um espaço bidimensional de dimensões ilimitadas.

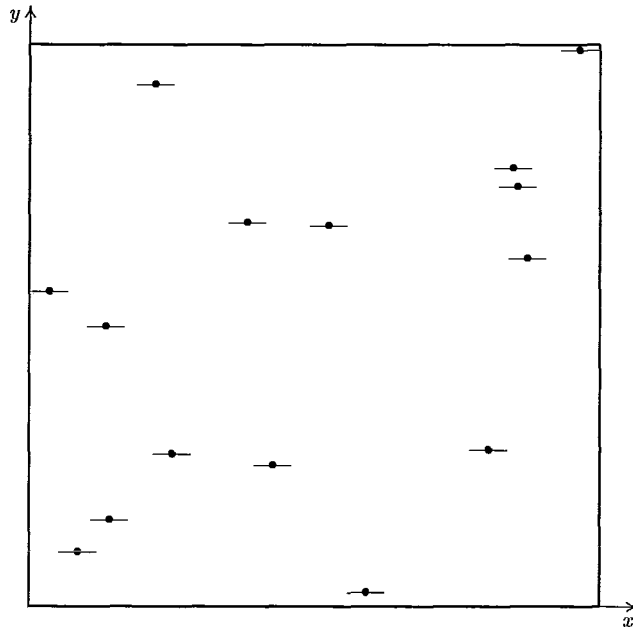


Figura 4.1: O quadrado de lados unitários paralelos aos eixos x e y . No início da simulação, os pássaros artificiais são dispostos aleatoriamente no seu interior.

4.2 Simulações

Diversas simulações foram realizadas para $n = 15, 25, 35$ e $\alpha = 170^\circ, 180^\circ$. Os valores pequenos para o número total de pássaros artificiais utilizados na simulação são fundamentados na observação de que a ocorrência de formações em V em bandos com grande número de pássaros é inerentemente difícil, e raramente observada na natureza [57]. Todas as simulações foram executadas por $T = 2000$ intervalos de tempo. Os parâmetros relacionados à distâncias e deslocamentos são listados na Tabela 4.1. Na simulação, o quadrado que contém os pássaros inicialmente possui dimensões de 768 *pixels*, de forma que os parâmetros devem ser divididos por esse valor para que se obtenham as distâncias com relação a um quadrado de dimensões unitárias. Como pode ser observado na tabela, o deslocamento longitudinal base utilizado, Δy , possui o valor 0. Isto pode ser feito devido ao fato de que, uma vez que todos os pássaros possuem a mesma velocidade base, apenas os deslocamentos relativos entre os pássaros são relevantes à simulação.

A Figura 4.2 ilustra alguns instantes da evolução de um bando de pássaros artificiais ao longo do tempo, desde a configuração inicial aleatória até ser alcançada a estabilidade. Neste exemplo, em particular, o grupo tornou-se estável no instante de

Tabela 4.1: Valores dos parâmetros para pássaros de grande porte (Multiplicados por 768).

| Parâmetro | Valor | Descrição |
|------------|-------|--|
| ℓ | 30 | Comprimento lateral da região de fluxo de ar positivo |
| d | 50 | Comprimento longitudinal da região de fluxo de ar positivo |
| w | 50 | Envergadura |
| Δx | 3 | Deslocamento lateral base por intervalo de tempo |
| Δy | 0 | Deslocamento longitudinal base por intervalo de tempo |
| δy | 3 | Variação na posição devida à mudança de velocidade |
| ϵ | 9 | Margem para colisão longitudinal |
| λ | -5 | Espaçamento lateral ótimo |

tempo $t = 200$.

Para que fosse possível realizar uma avaliação quantitativa dos resultados obtidos nas simulações, cinco indicadores, listados a seguir, foram concebidos. Os valores para cada um deles foram obtidos calculando-se as médias dos resultados provenientes de 1 000 simulações independentes, cada uma delas com uma configuração inicial aleatória diferente para o posicionamento dos pássaros no quadrado de dimensões unitárias.

Tempo para estabilização: Número necessário de intervalos de tempo até que o critério de estabilidade (Equação 3.8) seja satisfeito.

Número de líderes: Quantidade de pássaros que não possuem nenhuma parte de seu corpo ou asas nas regiões de fluxo de ar positivo de qualquer outro pássaro.

Número de grupos desconexos: Um conjunto de pássaros corresponde a um grupo desconexo se nenhum pássaro que não pertença ao grupo intercepta as regiões de fluxo de ar positivo de qualquer membro do grupo. A formação ilustrada na Figura 4.3 contém dois grupos desconexos.

Número de segmentos de reta: Um segmento de reta liga um pássaro na região posterior do bando, ou seja, um pássaro cujas regiões de fluxo de ar positivo não são interceptadas por nenhum outro pássaro, a um pássaro líder, conforme descrito no indicador acima, ou a um pássaro que cause uma “bifurcação” – um pássaro que não é um líder e que tem suas regiões de fluxo de ar positivo interceptadas por dois outros pássaros. A formação ilustrada na Figura 4.4 possui dois segmentos de reta.

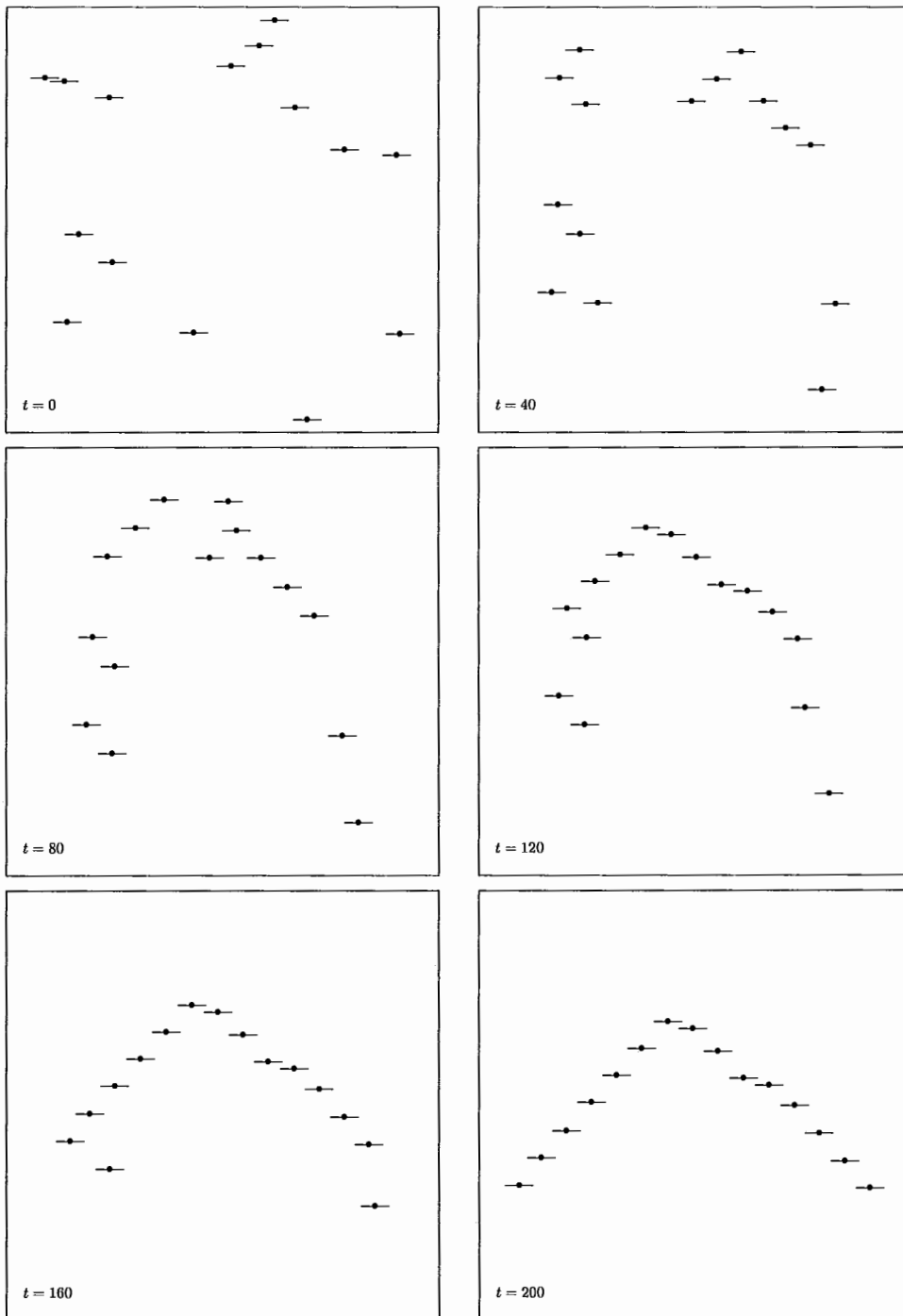


Figura 4.2: Evolução no tempo de um grupo de pássaros a partir de uma configuração inicial aleatória no instante de tempo $t = 0$ até ser alcançada a estabilidade no instante $t = 200$.

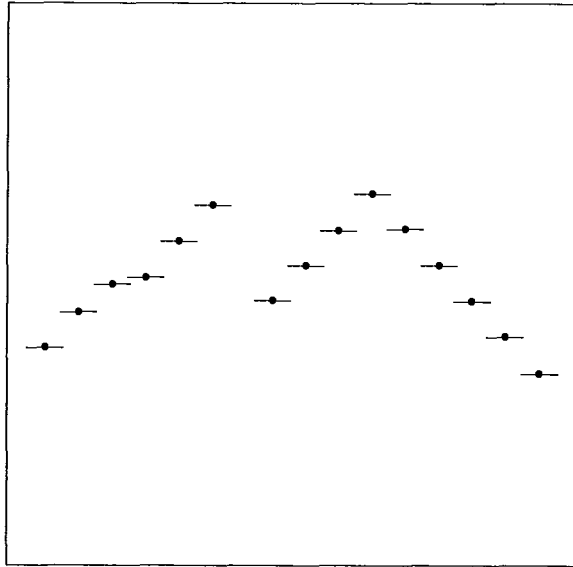


Figura 4.3: Formação de vôo com dois grupos desconexos.

Distância média aos segmento de reta mais próximos: Cada pássaro contribui com uma distância à média, com exceção daqueles que causam “bifurcações” na formação. Estes contribuem com a média das distâncias aos dois segmentos de reta mais próximos.

Todos os indicadores, com exceção do tempo para estabilização, referem-se ao final da simulação, ou seja, após $T = 2000$ intervalos de tempo. Alguns exemplos das formações obtidas para $n = 15$ pássaros são ilustrados na Figura 4.5, com ângulo de busca $\alpha = 180^\circ$ e na Figura 4.6, com $\alpha = 170^\circ$.

Na primeira figura, podem ser observadas as formações em V, J e escalão, conforme a classificação de Heppner [20], descrita na Seção 2.1. Na segunda figura, observam-se a formação em W, correspondente à união de dois J's, uma formação com dois J's desconexos e a formação em V invertido.

Quantitativamente, a análise dos cinco indicadores descritos acima pode ser resumida na Figura 4.7. Os gráficos de barra indicam os valores médios de 1 000 simulações independentes para cada indicador.

A Figura 4.7(a) mostra o tempo médio para a estabilização da formação, de acordo com a Equação 3.8. Nota-se que para $\alpha = 170^\circ$, o tempo necessário para a estabilização do bando é sempre maior do que para $\alpha = 180^\circ$. Tal fato pode ser compreendido se considerarmos a observação realizada na Seção 3.4.3. Com $\alpha = 170^\circ$, a situação de

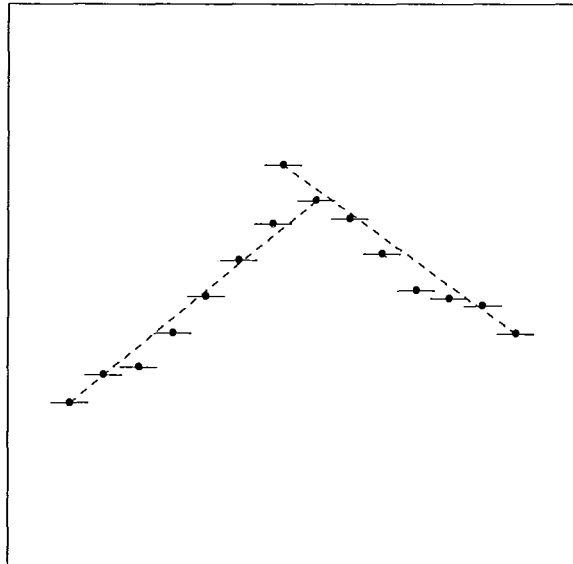


Figura 4.4: Formação de vôo com dois segmentos de reta, exibidos com linhas tracejadas. O segundo pássaro a partir do topo causa uma “bifurcação” na formação.

instabilidade ilustrada na Figura 3.5 leva algumas simulações a permanecerem instáveis indefinidamente, fazendo com que os 2000 intervalos de tempo sejam computados na média do tempo para a estabilização. Já com $\alpha = 180^\circ$, todas as instâncias alcançam a estabilidade antes dos 2000 intervalos de tempo que limitam a simulação, o que explica os valores observados para este indicador.

Na Figura 4.7(b), pode ser observado o número médio de pássaros líderes, conforme o indicador definido acima. Nota-se que para $\alpha = 180^\circ$, todas as formações possuem apenas um líder. Isto deve-se ao fato de que, por definição, um pássaro líder não recebe ajuda aerodinâmica de nenhum outro pássaro do bando, o que em outras palavras significa que um pássaro líder nunca busca posicionar-se de acordo com o comportamento ditado pela Regra 1, pois não há pássaros cobertos pelo seu ângulo de busca, e portanto não há pássaros dos quais ele possa aproximar-se. Quando $\alpha = 170^\circ$, isto pode acontecer para mais de um pássaro no bando, mas com $\alpha = 180^\circ$, apenas o pássaro que possuir o maior valor para sua coordenada y não terá nenhum pássaro coberto pelo ângulo de busca, e portanto apenas um líder poderá existir no bando.

Os dados observados no gráfico de barras da Figura 4.7(c) exibem o número de grupos desconexos ao fim da simulação. Grupos desconexos podem ser definidos como grupos de pássaros onde todos os membros de um grupo estão separados dos pássaros do outro grupo por uma distância maior do que as definidas lateral e longitudinalmente

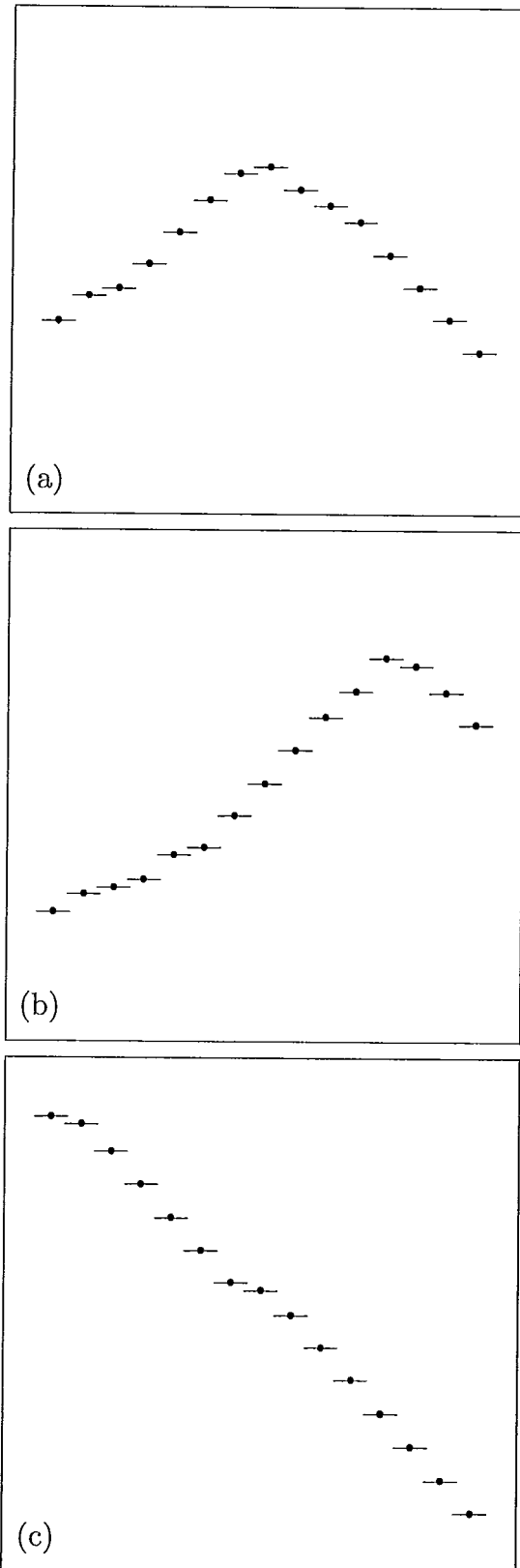


Figura 4.5: Formações de vôo para os pássaros artificiais após $T = 2000$ intervalos de tempo, atingidas a partir de configurações iniciais aleatórias independentes para $n = 15$ e $\alpha = 180^\circ$. As formações correspondem às configurações em V (a), J (b) e escalo (c) catalogadas por Heppner.

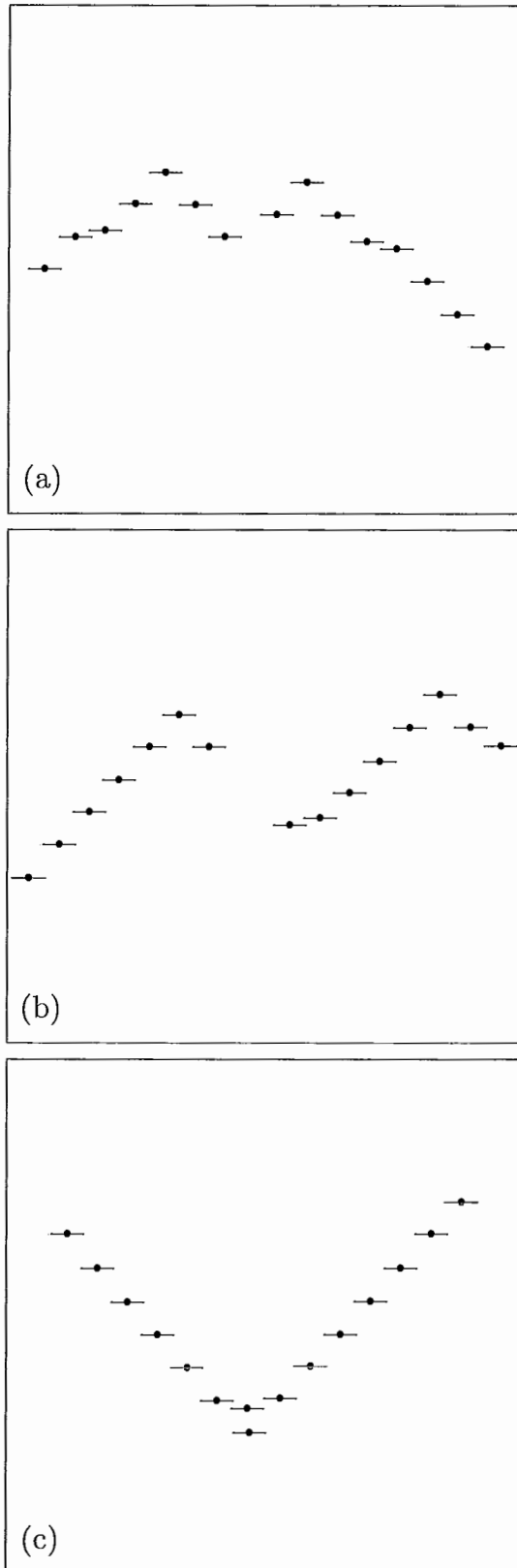


Figura 4.6: Formações de vôo para os pássaros artificiais após $T = 2000$ intervalos de tempo, atingidas a partir de configurações iniciais aleatórias independentes para $n = 15$ e $\alpha = 170^\circ$. Em (a), a formação em W corresponde à união dois J's. Em (b), pode-se observar dois grupos desconexos, e em (c), observa-se a formação em V invertido.

como suficientes para que se tome proveito do efeito dos fluxos de ar positivos gerados pelo vôo dos pássaros. O fato de que para $\alpha = 180^\circ$ existe apenas um grupo na formação final é decorrência direta da observação feita para o indicador anterior. Cada grupo desconexo deve possuir ao menos um líder, e bandos de pássaros com ângulo de busca $\alpha = 180^\circ$ possuem sempre apenas um líder, de forma que, para este valor de α , pode haver apenas um grupo.

O número médio de segmentos de reta observados na simulação, exibido na Figura 4.7(d), é também consequência direta da observação realizada para o segundo indicador. Em bandos com $\alpha = 180^\circ$, pelo fato de que pode existir apenas um líder, o número de segmentos de reta encontra-se próximo de dois, indicando a predominância de formações em V ou J, embora possam haver situações em que este número varie, como nas formações em escalão, onde há apenas um segmento de reta.

Na Figura 4.7(e), observam-se os valores alcançados para a distância média aos segmentos de reta mais próximos de cada pássaro. É interessante observar que, para $\alpha = 170^\circ$, como é possível a existência de diversos grupos desconexos, em geral os segmentos de reta são compostos por um menor número de pássaros. Se considerarmos que os dois pássaros que compõem as extremidades de cada segmento contribuem com distância zero ao referido segmento, e que esta contribuição torna-se mais relevante em grupos de pássaros com menor número de membros, é natural concluir que para este valor de α sejam obtidos valores menores do que aqueles observados para $\alpha = 180^\circ$, onde um maior número de pássaros pertence a cada segmento.

Finalmente, a Figura 4.7(f) exhibe uma amostra da evolução no tempo do indicador anterior para dez simulações escolhidas aleatoriamente com $n = 25$ e $\alpha = 170^\circ$. Estas distâncias são calculadas por meio de duas execuções de cada simulação. Inicialmente, cada simulação é executada, e ao fim dos $T = 2000$ intervalos de tempo, os pássaros que delimitam cada segmento de reta da formação são definidos, assim como os demais pássaros que os compõem. Em seguida, a simulação é repetida, e a cada turno são calculadas a posição atual de cada segmento e as distâncias dos mesmos aos pássaros que os compõem. O gráfico permite que seja observada a convergência da distância média até o instante em que é atingida a estabilidade, onde os valores tornam-se constantes.

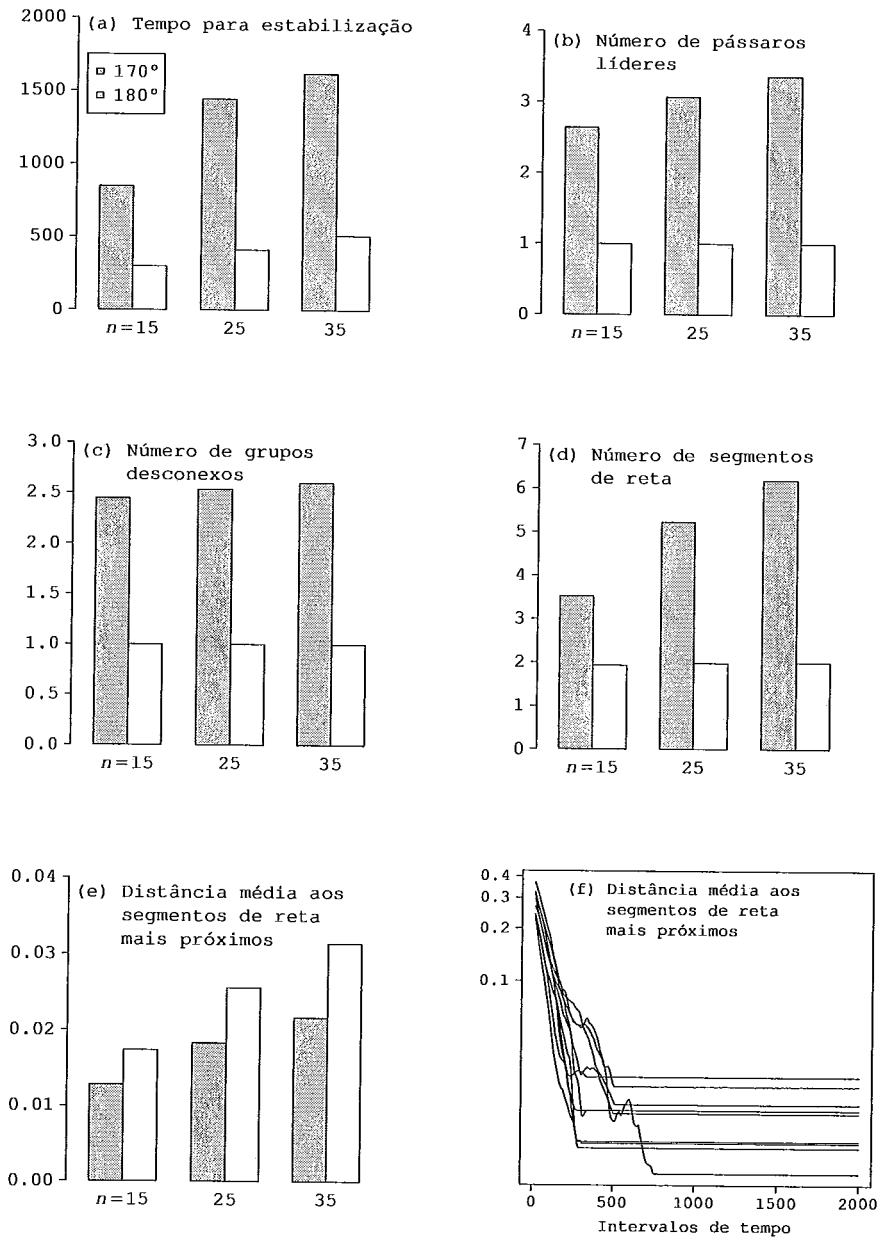


Figura 4.7: Média de 1 000 simulações independentes dos cinco indicadores (a–e) e a evolução no tempo do quinto indicador para dez simulações escolhidas aleatoriamente com $n = 25$ e $\alpha = 170^\circ$ (f).

Capítulo 5

Algoritmo para pássaros de pequeno porte

5.1 Introdução

Embora pareça claro que os efeitos aerodinâmicos forneçam uma contribuição primordial na emergência de formações de vôo em bandos de pássaros, como descrito nos diversos trabalhos citados anteriormente, e observado nas simulações detalhadas nos Capítulos 3 e 4, é preciso considerar que, no que diz respeito a pássaros de menor porte, tais efeitos serão naturalmente menos intensos, ou mesmo desprezíveis.

Neste capítulo, será considerado que os efeitos aerodinâmicos resultantes do movimento das asas dos pássaros em vôo são de fato desprezíveis, no sentido de que os fluxos de ar gerados por estes não possuem magnitude suficiente para influenciar as decisões relativas ao posicionamento dos demais membros do bando em vôo próximo. As regras descritas no Capítulo 3 serão modificadas de forma a eliminar do processo de posicionamento os efeitos da busca pelo ponto de fluxo de ar positivo máximo.

Serão levados em conta, portanto, apenas o desejo inato de cada pássaro pelo vôo em bandos, e a necessidade destes de modificar o seu posicionamento no sentido de manter sua visão desobstruída. Desta forma, procurou-se criar um modelo que corresponda à hipótese que utiliza-se da orientação visual para explicar o surgimento de formações de vôo semelhantes a V's, como descrito na Seção 2.1.2.

Podemos listar as três novas regras de posicionamento, obedecidas por pássaros de

pequeno porte, como abaixo.

Regra 1 (regra de agrupamento): Aproximar-se do pássaro mais próximo.

Regra 2 (regra de busca de lacunas): Se a Regra 1 não mais se aplicar, buscar a região mais próxima que possibilite a desobstrução da visão longitudinal.

Regra 3 (regra de posicionamento): Aplicar a Regra 2 enquanto a desobstrução pretendida não for alcançada.

As Regras 1 e 2 são exatamente as mesmas obedecidas pelos pássaros artificiais de grande porte. Já a terceira regra é uma simplificação da Regra 3 seguida por estes, onde é eliminada a ação de movimentação lateral incentivada pela diminuição do esforço realizado no vôo, uma vez que tal diminuição ocorre devido a efeitos aerodinâmicos que, no modelo atual, são imperceptíveis.

Para pássaros de pequeno porte, o parâmetro λ , que para pássaros de grande porte indica o ponto ótimo de redução do esforço de vôo, deixa de ter significado, e é substituído pelo indicador Λ , que determina a distância mínima para que um pássaro artificial tenha sua visão completamente desobstruída. Adicionalmente, os parâmetros d e ℓ , que delimitam a região de fluxo de ar positivo em pássaros artificiais de grande porte, passam a ter um novo significado para pássaros de porte reduzido. Como não existem mais regiões de fluxo de ar significativas a serem consideradas, estes parâmetros passam a representar meramente uma “distância mínima de pertinência ao bando”, o que em outras palavras significa dizer que um pássaro deixa de aplicar a Regra 1 e passa a buscar um posicionamento que desobstrua sua visão uma vez que esteja localizado na região delimitada por estes parâmetros. O parâmetro Λ , bem como as regiões delimitadas pelos parâmetros d e ℓ são ilustrados na Figura 5.1.

Sejam então j um pássaro movimentando-se na direção do pássaro mais próximo de si, digamos i . De acordo com a Regra 1, j irá aproximar-se até que haja interseção de alguma parte de seu corpo ou asas com a região delimitada pelos parâmetros d e ℓ referentes a i . Uma vez alcançando este posicionamento, o pássaro j irá, caso necessário, movimentar-se lateralmente, de acordo com as Regras 2 e 3 para desobstruir sua visão.

Considerando-se ambos os algoritmos, pode-se dizer que, em essência, eles diferem no sentido de que o algoritmo para pássaros de grande porte leva-os a posicionarem-

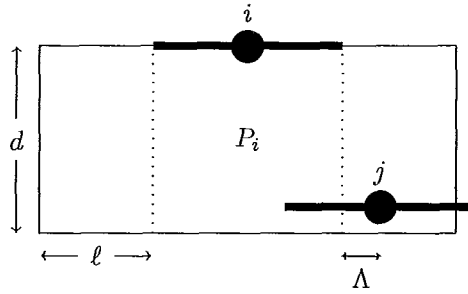


Figura 5.1: A distância mínima Λ para que o pássaro i tenha sua visão desobstruída, e as distâncias vertical e horizontal, d e ℓ , respectivamente, que delimitam a região de proximidade determinando a pertinência ao bando.

se no ponto ótimo de redução do esforço de vôo, enquanto o algoritmo para pássaros de pequeno porte leva a um posicionamento que corresponde a um ponto qualquer dentro da região de proximidade, dada a restrição de que o espaçamento lateral deve ser suficiente para permitir que a visão dos pássaros esteja desobstruída.

Analogamente à descrição formal das regras de posicionamento para pássaros de grande porte realizada no Capítulo 3, são detalhados a seguir os aspectos relevantes às regras correspondentes aos pássaros de porte menor. As considerações referentes ao ambiente onde os pássaros artificiais estão inseridos realizadas anteriormente permanecem válidas. Todos os pássaros envolvidos na simulação são iguais e voam na direção do eixo y em um plano infinito. Da mesma forma que no modelo anterior, nenhum tipo de conhecimento global é utilizado pelos pássaros, e cada um deles toma decisões com base nas três regras descritas acima, levando em consideração apenas a localização dos demais pássaros pertencentes ao bando, limitada pelo ângulo de busca.

5.2 Definições

As definições descritas na Seção 3.2 continuam válidas, com as seguintes excessões:

- d e ℓ delimitam não mais as regiões de fluxo de ar positivos associados a cada pássaro, mas sim a região de proximidade que define a pertinência de um pássaro ao bando.
- O parâmetro λ deixa de existir, uma vez que, dada a inexistência de efeitos aerodinâmicos relevantes, a noção de uma distância de separação ótima entre dois pássaros devida à redução do esforço de vôo passa a não mais fazer sentido.

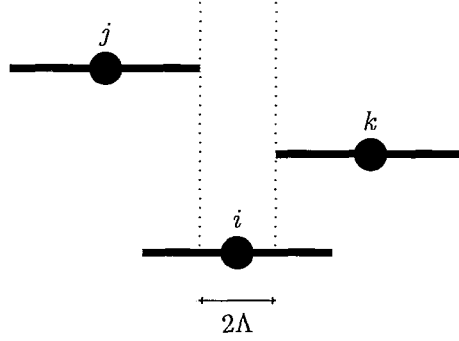


Figura 5.2: O pássaro i tem sua visão desobstruída se a faixa longitudinal de largura 2Λ , com centro em $x_i(t)$, não interceptar qualquer parte do corpo ou asas dos demais membros do bando.

- As regiões U_i^- , U_i^+ e D_i dão lugar a uma região única, P_i , que define a região de proximidade do pássaro i de acordo com os parâmetros d e ℓ descritos acima. Dado um pássaro j , diz-se que $j \in P_i$ no instante t se

$$\begin{cases} y_i(t) > y_j(t) \\ d_{ji}^y(t) \leq d \\ d_{ji}^x(t) \leq \ell + \frac{w}{2} \end{cases} \quad (5.1)$$

Além disso, é adicionado o parâmetro Λ , que corresponde à distância lateral mínima que deve existir entre o centro do corpo de um pássaro e a ponta da asa mais próxima de pássaros à sua frente para que sua visão possa ser considerada desobstruída. Dado um pássaro i e dois pássaros j e k , no intervalo de tempo t , com $y_i(t) < y_j(t)$, $y_i(t) < y_k(t)$, $x_i(t) > x_j(t)$ e $x_i(t) < x_k(t)$, dizemos que a visão de i está desobstruída de as duas condições abaixo forem satisfeitas.

$$\begin{cases} d_{ij}^x(t) \geq \Lambda + \frac{w}{2} \\ d_{ik}^x(t) \geq \Lambda + \frac{w}{2} \end{cases} \quad (5.2)$$

Em outras palavras, para que a visão de um pássaro i possa ser considerada desobstruída no intervalo de tempo t , é preciso que haja uma faixa longitudinal de largura 2Λ , com centro em $x_i(t)$, que não faça interseção com qualquer parte do corpo ou das asas de nenhum outro pássaro do bando, como ilustrado na Figura 5.2.

5.3 O algoritmo

O Algoritmo 2, descrito a seguir, é essencialmente equivalente ao Algoritmo 1, descrito na Seção 3.3, adequado às novas definições listadas acima, e tendo eliminada a busca pela distância de separação ótima referente ao ponto de fluxo de ar positivo máximo.

Algoritmo 2 Algoritmo para o pássaro i no intervalo de tempo t

- 1: **Se** $\mathcal{S}_i(t) = \emptyset$ **então**
 - 2: $y_i(t) := y_i(t) + \Delta y$
 - 3: **Senão**
 - 4: **Se** $\exists j$ tal que $i \in P_j$ **então**
 - 5: **Se** $d_{ij}^x - \frac{w}{2} < \Lambda$ e houver lacunas visíveis a i **então**
 - 6: Seja $\Delta x_i(t) = \pm \min \{ \Delta x, |d_{ij}^x - \frac{w}{2} - \Lambda| \}$, com sinal determinado pela regra de desobstrução da visão.
 - 7: **Se** o acréscimo de $\Delta x_i(t)$ a $x_i(t)$ não causar uma colisão **então**
 - 8: $x_i(t) := x_i(t) + \Delta x_i(t)$
 - 9: **Senão**
 - 10: Seja $\Delta y_i(t) = \pm \delta y$ com sinal determinado aleatoriamente.
 - 11: **Se** o acréscimo de $\Delta y_i(t)$ a $y_i(t)$ não causar uma colisão **então**
 - 12: $y_i(t) := y_i(t) + \Delta y + \Delta y_i(t)$
 - 13: **Senão**
 - 14: Seja $j \in \mathcal{S}_i(t)$ tal que $j = \arg \min_{k \in \mathcal{S}_i(t)} \{ d_{ik}(t) \}$.
 - 15: $y_i(t) := y_i(t) + \Delta y + \delta y$
 - 16: **Se** $x_i(t) < x_j(t) - w$ **então**
 - 17: $x_i(t) := x_i(t) + \Delta x$
 - 18: **Senão se** $x_i(t) > x_j(t) + w$ **então**
 - 19: $x_i(t) := x_i(t) - \Delta x$
-

As diferenças entre os Algoritmos 1 e 2 resumem-se à especificação da região de proximidade de um pássaro, na linha 4, como discutido acima e ilustrado na Figura 5.1, à substituição do critério de parada dos deslocamentos laterais pelo alcance da distância mínima de desobstrução da visão, em oposição ao posicionamento no ponto de esforço aerodinâmico mínimo (linha 5), e à especificação da magnitude destes deslocamentos em função da distância mínima na direção do eixo x para a desobstrução da visão, Λ (linha 7), em contraste ao uso de um parâmetro de separação lateral relacionado ao ponto ótimo para a obtenção de benefícios aerodinâmicos.

Pode-se analisar o Algoritmo 2 em termos do espaçamento mínimo que deve existir entre dois pássaros pertencentes a um bando para que aquele com menor coordenada na direção do eixo y tenha a sua visão desobstruída. Assim, define-se um parâmetro de separação lateral análogo ao utilizado no Algoritmo 1, e definido na Seção 3.2, expresso

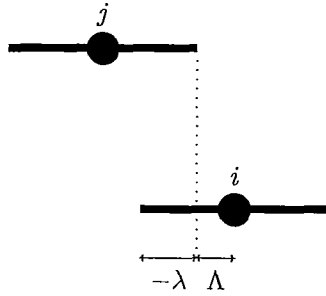


Figura 5.3: A distância mínima para a desobstrução da visão pode ser interpretada em termos da separação entre os pássaros artificiais, com o parâmetro λ .

abaixo.

$$-\lambda = \frac{w}{2} - \Lambda, \quad (5.3)$$

onde o sinal negativo é utilizado para que, da mesma forma que no Algoritmo 1, a separação lateral implique em uma sobreposição das asas dos pássaros artificiais considerados na coordenada do eixo x , como ilustrado na Figura 5.3.

Com esta interpretação, a “regra de desobstrução da visão”, citada na linha 5 do Algoritmo 2 resume-se à regra de busca de lacunas descrita na Seção 3.3.1, e os algoritmos portanto diferem apenas no fato de que para os pássaros de grande porte, existe uma posição ótima que permite um benefício aerodinâmico ótimo, enquanto os pássaros de menor porte buscam apenas uma distância mínima, o que implica na existência de uma região de posicionamento aceitável, onde um pássaro, em relação aos demais membros do bando, encontra-se a uma distância pequena o suficiente para que ele possa fazer parte do grupo, mas grande o suficiente para que sua visão não seja obstruída.

Desta forma, considera-se que existe uma equivalência comportamental entre os pássaros, seja qual for o seu porte, uma vez que as ações tomadas por estes diferem essencialmente por um fator externo – a existência de fluxos de ar significativos o suficiente para que a redução no esforço de vôo de pássaros em formação seja perceptível, e justifique a busca por um posicionamento ótimo. Esta uniformidade parece bem fundamentada com base nas observações de pássaros na natureza, e permite que os resultados apresentados neste trabalho sejam comparados de maneira mais significativa.

5.3.1 Regra de desobstrução da visão

5.3.2 Deslocamentos laterais

Considerações análogas às realizadas com relação ao deslocamento lateral de membros do bando no algoritmo para pássaros de grande porte podem ser feitas para os pássaros de menor porte. A magnitude do movimento realizado na direção do eixo x é definida como

$$\min\{\Delta x, |d_{ij}^x - \frac{w}{2} - \Lambda|\}, \quad (5.4)$$

que pela Equação 5.3 equivale a

$$\min\{\Delta x, |d_{ij}^x - w - \lambda|\}, \quad (5.5)$$

o mesmo valor utilizado no Algoritmo 1.

Com isso, é evitado o comportamento de movimentos oscilatórios, analogamente à discussão realizada na Seção 3.3.2. Embora no algoritmo para pássaros de pequeno porte o comportamento oscilatório não ocorra nas proximidades do ponto correspondente à distância mínima para a desobstrução da visão, uma vez que este apenas delimita o início da região de desobstrução, e os pássaros não busquem o posicionamento exato neste ponto, há situações onde a ocorrência do comportamento de movimentos oscilatórios é possível.

Considere, por exemplo, a Figura 5.2. Nas condições ilustradas nesta figura, existe uma lacuna de comprimento 2Λ entre os pássaros j e k , onde está posicionado o pássaro i . Assumindo, sem perda de generalidade, que o trajeto percorrido por i ao aplicar as Regras 1 e 2 o tenha levado a posicionar-se atrás do pássaro k , e que, ao aplicar a Regra 3, a lacuna entre j e k tenha sido identificada como aquela mais próxima de si, é fácil perceber que, uma vez que o comprimento da lacuna é o mínimo suficiente para que um pássaro ali posicionado não tenha sua visão obstruída, se considerarmos que os deslocamentos na direção do eixo x possuem magnitude constante, então i apresentará comportamento oscilatório com grande probabilidade. Para posicionar-se na referida lacuna, sem obstrução da visão, i precisaria mover-se de forma a fazer $x_i(t) = x_j(t) + \frac{w}{2} + \Lambda = x_k(t) - \frac{w}{2} - \Lambda$. Ao mover-se para a esquerda, entretanto, os deslocamentos de magnitude constante fariam com que $x_i(t)$ eventualmente alcançasse um valor menor

do que este valor-alvo. Assim, posteriormente, i mover-se-ia para a direita, e $x_i(t)$ desta vez tornar-se-ia maior do que o valor-alvo, fazendo com que i se movesse novamente para a esquerda, e assim sucessivamente, caracterizando o movimento oscilatório.

As soluções alternativas para a eliminação do comportamento aleatório apresentadas na Seção 3.3.2, ou seja, a redução do valor do parâmetro Δx e o uso do coeficiente de memória μ , também são pertinentes no que diz respeito ao algoritmo para pássaros de pequeno porte. Portanto as observações realizadas naquela seção permanecem válidas neste contexto.

Capítulo 6

Resultados da simulação para pássaros de pequeno porte

6.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas com o algoritmo para pássaros artificiais de pequeno porte. Analogamente ao procedimento realizado no Capítulo 4, as simulações aqui apresentadas operam sobre n pássaros artificiais e são executadas por T intervalos de tempo, com posicionamento inicial aleatório em um quadrado de dimensões unitárias, de lados paralelos aos eixos x e y .

Os valores utilizados para n , T e α nas simulações de pássaros de grande porte foram também utilizados nestas simulações, ou seja, $n = 15, 25, 30$, $T = 2000$ and $\alpha = 170^\circ, 180^\circ$. A Tabela 6.1 lista os parâmetros relacionados a distâncias e deslocamentos utilizados nas simulações, novamente multiplicados por 768 *pixels*, o comprimento do lado do quadrado onde os pássaros estão inicialmente posicionados utilizado no ambiente de simulação. Cabe aqui mencionar que diversos valores foram utilizados para o parâmetro Λ sem que houvesse modificações significativas nos resultados obtidos, com exceção do caso onde $\Lambda = 0$, discutido em maiores detalhes posteriormente. Desta forma, para as simulações aqui apresentadas, o parâmetro foi fixado com o valor apresentado na tabela.

Como pode ser observado, os valores utilizados para os parâmetros comuns aos dois algoritmos são os mesmos daqueles da simulação para pássaros de grande porte.

Tabela 6.1: Valores dos parâmetros para pássaros de pequeno porte (Multiplicados por 768).

| Parâmetro | Valor | Descrição |
|------------|-------|---|
| ℓ | 30 | Comprimento lateral da região de proximidade |
| d | 50 | Comprimento longitudinal da região de proximidade |
| w | 50 | Envergadura |
| Δx | 3 | Deslocamento lateral base por intervalo de tempo |
| Δy | 0 | Deslocamento longitudinal base por intervalo de tempo |
| δy | 3 | Varição na posição devida à mudança de velocidade |
| ϵ | 9 | Margem para colisão longitudinal |
| Λ | 10 | Distância mínima para desobstrução visual |

Embora a simulação aqui apresentada tenha como alvo pássaros de menor porte, o uso dos mesmos parâmetros permitirá que seja realizada uma discussão sobre os resultados da remoção dos efeitos aerodinâmicos e o seu papel na formação de vôo dos pássaros, sem que haja qualquer influência nas medições apresentadas.

Para a avaliação quantitativa dos resultados da simulação, os mesmos indicadores do Capítulo 4 foram utilizados, o que permite que comparações entre estes para as duas classes de pássaros sejam realizadas. A Figura 6.1 ilustra os resultados obtidos para os pássaros de pequeno porte. Assim como no Capítulo 4, os gráficos correspondem às médias dos resultados coletados para cada um dos indicadores por meio de 1 000 simulações independentes de pássaros artificiais, desta vez obedecendo às regras do Algoritmo 2.

A comparação dos resultados ilustrados na Figura 6.1 com aqueles obtidos para pássaros de grande porte, ilustrados na Figura 4.7, permite que algumas observações relevantes sejam realizadas. Inicialmente, vê-se que os números apresentados para os três primeiros indicadores, ou seja, tempo para estabilização, número de pássaros líderes e número de grupos desconexos [itens (a–c) das respectivas figuras] são extremamente semelhantes para as duas classes de pássaros, possuindo o mesmo comportamento dadas as variações nos parâmetros n e α nas simulações. Esta semelhança pode ser compreendida uma vez que considere-se que os três primeiros indicadores são fundamentalmente independentes do valor do parâmetro λ , principal diferenciador entre os Algoritmos 1 e 2. Adicionalmente, cabe observar que, assim como nas simulações realizadas anteriormente, o número de pássaros líderes e o número de grupos desconexos deve ser igual a 1 também para os pássaros de pequeno porte quando $\alpha = 180^\circ$, uma vez que nestas

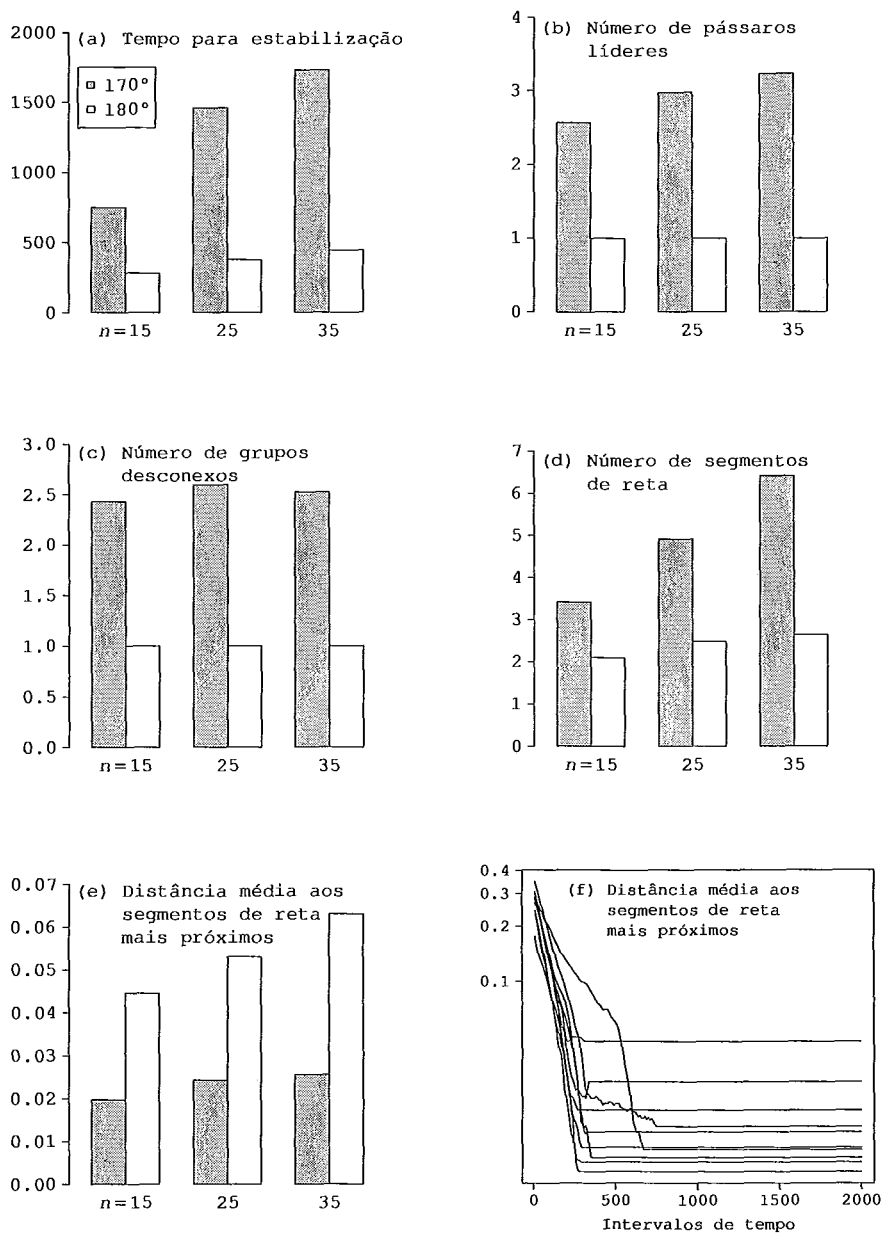


Figura 6.1: Média de 1000 simulações independentes de pássaros de pequeno porte para os cinco indicadores (a–e) definidos no Capítulo 4 e a evolução no tempo do quinto indicador para dez simulações escolhidas aleatoriamente com $n = 25$ e $\alpha = 170^\circ$ (f).

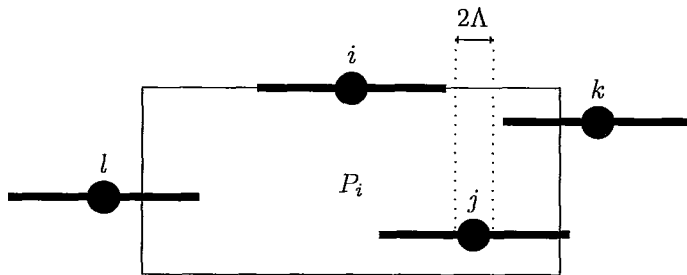


Figura 6.2: O pássaro j encontra-se em uma situação de estabilidade, mesmo posicionado atrás dos pássaros i e k , pois critério de desobstrução visual é satisfeito. Esta configuração é a base para o surgimento de formações com mais de dois segmentos de reta, mesmo com $\alpha = 180^\circ$.

condições, apenas o pássaro com maior valor para sua coordenada y não tem qualquer pássaro do bando na região coberta pelo seu ângulo de busca, e desta forma apenas um líder, e conseqüentemente, apenas um grupo desconexo podem existir.

O indicador da Figura 6.1(d) corresponde ao número de segmentos de reta após a estabilização do bando. Embora os valores correspondentes ao ângulo de busca $\alpha = 170^\circ$ apresentem, como esperado, o mesmo comportamento observado na Figura 4.7(d), nota-se que para $\alpha = 180^\circ$, a média desses valores foi superior a 2, o que parece contradizer a observação de que, havendo apenas um pássaro líder, como mencionado acima, devem haver apenas um ou dois segmentos de reta em uma formação, correspondendo às formações em escalão e em V ou J, respectivamente. Entretanto, é preciso observar que, para os pássaros de pequeno porte, não existe um posicionamento ótimo correspondente ao ponto de menor esforço de vôo, e o parâmetro λ apenas delimita a região de desobstrução da visão, como já discutido. Desta forma, um pássaro pode posicionar-se atrás de outros membros do bando, desde que o critério de desobstrução visual seja satisfeito, como ilustrado na Figura 6.2. Este fato permite o surgimento de formações como V ou J ramificados (cf. Seção 2.1), que, por definição, possuem um número de segmentos de reta maior do que dois. Algumas formações em V ou J ramificados são ilustradas na Figura 6.3.

O quinto indicador, a distância média ao segmento de reta mais próximo, ilustrado na Figura 6.1(e), permite que seja medido o efeito da ausência da influência aerodinâmica nas formações de pássaros de pequeno porte. Quando comparados aos resultados ilustrados na Figura 4.7(e), pode-se observar que os valores obtidos para os pássaros de pequeno porte são maiores do que aqueles obtidos para os pássaros

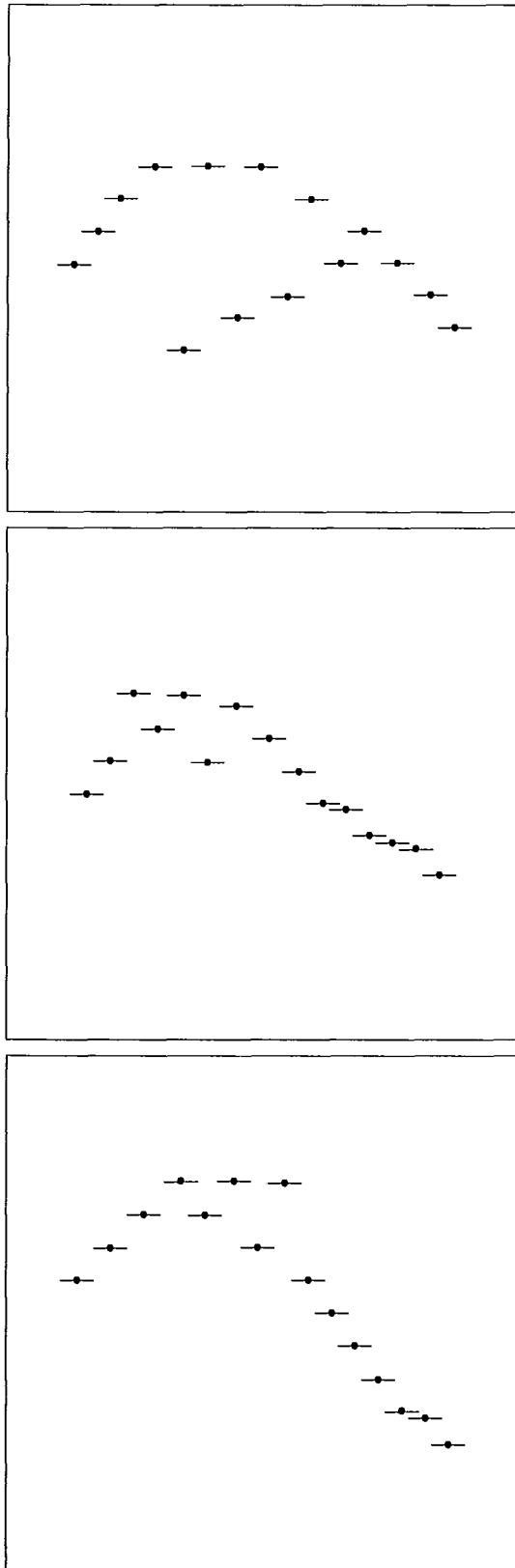


Figura 6.3: Formações de vôo para pássaros artificiais de pequeno porte com $\alpha = 180^\circ$. O critério de desobstrução visual permita emergência de configurações em V's e J's ramificados, levando a um número médio de segmentos de reta maior do que dois, mesmo havendo apenas um pássaro líder.

de grande porte. Esta observação é consequência direta do fato de que os primeiros satisfazem-se com o posicionamento em qualquer ponto da região de proximidade de algum pássaro, enquanto os últimos buscam posicionar-se em um ponto ótimo, correspondente ao ponto de menor esforço aerodinâmico. Assim, os pássaros de pequeno porte podem posicionar-se em pontos mais afastados dos seus vizinhos mais próximos, o que leva a um aumento na distância média ao segmento de reta correspondente ao seu posicionamento. Cabe ainda observar que a possibilidade da existência de um maior número de segmentos de reta permite a emergência de configurações mais complexas como as formações em W ou V invertido mesmo quando $\alpha = 180^\circ$, enquanto para os pássaros de grande porte com este valor para o ângulo de busca, apenas as formações em V, J e escalão são possíveis.

A Figura 6.1(f) corresponde a uma amostra da evolução no tempo do indicador acima, em dez simulações escolhidas aleatoriamente, para $n = 25$ e $\alpha = 170^\circ$, assim como na Figura 4.7(f), permitindo que seja observada a convergência das distâncias médias e a sua evolução até que seja alcançada a estabilidade do grupo. As distâncias são calculadas da mesma forma descrita para os pássaros de grande porte na Seção 4.2.

As comparações realizadas entre os cinco indicadores para pássaros de grande e pequeno porte permitem que seja atestada a importância do fator da orientação visual, presente em ambos os algoritmos, na emergência de formações de vôo em bandos de pássaros. De acordo com os resultados observados nas simulações aqui apresentadas, podemos considerar que a influência aerodinâmica corresponde a um “fator de ajuste” que permite que os pássaros posicionem-se nos pontos ótimos de redução de esforço, dado que estes existam, como no caso dos pássaros de grande porte, além de contribuir para a existência de formações com menor variabilidade no que diz respeito ao espaçamento entre os pássaros, levando consequentemente a formações mais fiéis às formas de um V, J ou linha reta (escalão).

6.2 A importância da visão em formações de vôo

Para confirmar a importância que o fator da orientação visual possui no que diz respeito às formações de vôo em bandos de pássaros, foram realizadas simulações em que a distância mínima necessária para a desobstrução da visão foi considerada desprezível.

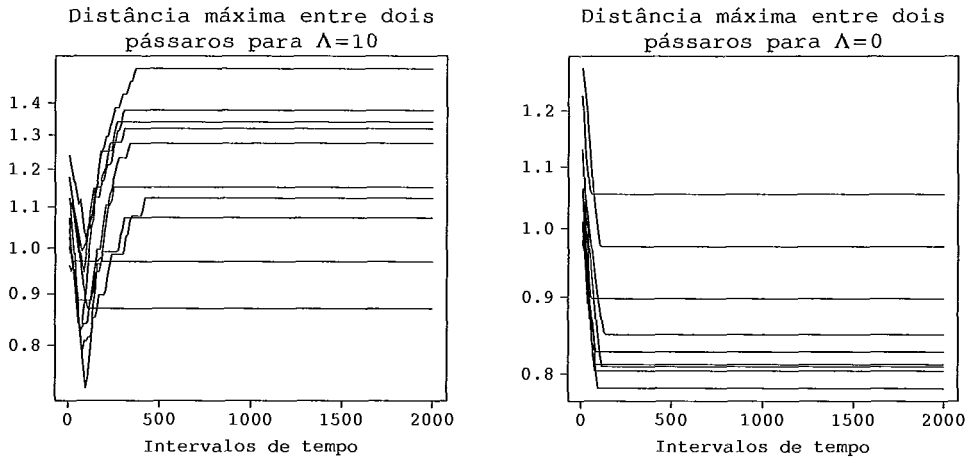


Figura 6.4: Evolução da distância máxima entre dois membros de bandos de pássaros artificiais de pequeno porte para $\Lambda = 10$ (a) e $\Lambda = 0$ (b) em dez simulações escolhidas aleatoriamente com $n = 25$ e $\alpha = 180^\circ$.

Em outras palavras, cada pássaro passou a ter, nestas simulações, o parâmetro Λ com valor 0.

Alguns exemplos do tipo de formação observada nestas condições são ilustrados na Figura 6.5. Como pode ser observado, as formações atingem a estabilidade sem que haja uma clara definição sobre a sua forma. Pode-se dizer que as formações obtidas nestas condições refletem uma situação intermediária na configuração do bando. De fato, o comportamento apresentado pode ser interpretado como uma simplificação do Algoritmo 2 onde apenas a Regra 1 é aplicada. Assim, os pássaros limitam-se a buscar a proximidade do bando, e uma vez que estejam agrupados, atingem a estabilidade.

Para que o comportamento de bandos de pássaros artificiais cuja distância de separação mínima para desobstrução visual seja significativa possa ser comparado quantitativamente com aquele de pássaros para os quais tal parâmetro é desprezível, um novo indicador foi utilizado. A evolução ao longo do tempo da compacidade do grupo, definida como a maior distância entre dois membros do bando em um dado instante de tempo, é ilustrada, para uma amostra de dez simulações escolhidas aleatoriamente, nas Figuras 6.4(a), para $\Lambda = 10$ e 6.4(b), para $\Lambda = 0$.

Como pode ser observado na Figura 6.4(a), existe uma tendência de queda na compacidade do grupo, seguida por um posterior aumento da mesma até que seja alcançado o equilíbrio. Tais variações correspondem às diferentes fases da simulação do comportamento dos pássaros. Inicialmente, os pássaros encontram-se posicionados ale-

atoriamente, e buscam a proximidade dos demais membros do bando. Portanto, ocorre uma diminuição progressiva na distância máxima entre dois pássaros. Em seguida, tem início o processo de busca pelo posicionamento que leva à desobstrução da visão, que corresponde ao posterior aumento da referida distância, uma vez que os pássaros tendem a afastar-se lateralmente. Esta fase termina quando é atingida a estabilização do grupo, momento no qual a medida torna-se constante.

Já a Figura 6.4(b) ilustra claramente a existência de apenas uma fase de variação da compacidade até que esta torne-se constante. Assim como no caso anterior, os pássaros inicialmente buscam a proximidade dos demais membros do grupo. Considerando-se que a distância mínima de separação lateral para a desobstrução visual é desprezível nesta configuração, ou seja, $\Lambda = 0$, os pássaros atingem a formação final assim que tal proximidade é alcançada, e portanto não ocorrem variações na compacidade a partir daí.

Desta forma, tendo como base os comportamentos aqui simulados, pode-se argumentar que a visão corresponde de fato a um fator fundamental no que diz respeito à emergência das formações de vôo tradicionalmente observadas em bandos de pássaros na natureza. Como mencionado acima, a influência aerodinâmica permite o ajuste das formações em um posicionamento ótimo para a redução do esforço de vôo, e leva a configurações onde o espaçamento entre os pássaros é mais homogêneo, e portanto a formações mais fiéis às formas semelhantes a V's. Entretanto, o fator visual é o agente que dá início às movimentações que levam a estas formações.

Tais conclusões parecem estar de acordo com as observações realizadas em bandos de pássaros na natureza, uma vez que formações semelhantes a V's podem ser identificadas em espécies de pássaros de diferentes portes, e portanto existem não apenas em grupos onde os efeitos aerodinâmicos podem ser considerados significativos.

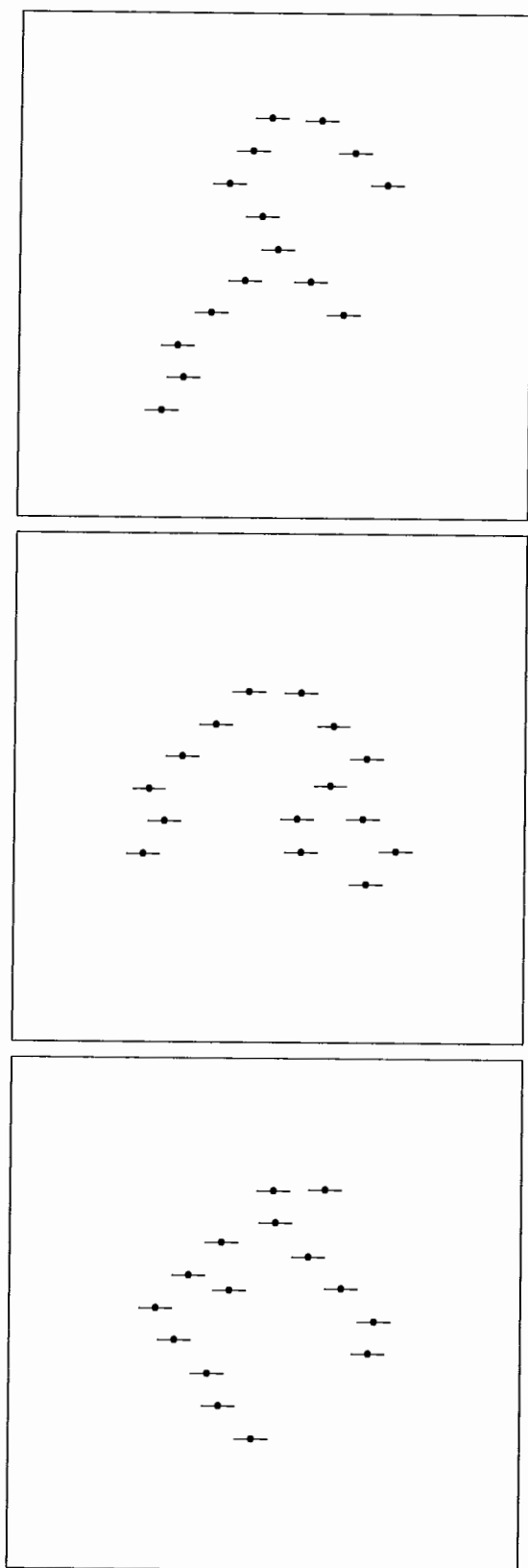


Figura 6.5: Formações de vôo para pássaros artificiais com $\Lambda = 0$ e $\alpha = 180^\circ$. O fato de que os pássaros nestas condições não precisam buscar a desobstrução visual impede a emergência de formações claras como as tradicionalmente catalogadas.

Capítulo 7

Conclusão

7.1 Comentários sobre o trabalho

O trabalho aqui realizado teve como objetivo a simulação comportamental do vôo de pássaros em bando, com o desenvolvimento de regras distribuídas que levem às formações de vôo tradicionalmente observadas na natureza. Embora precedido por trabalhos notáveis com objetivos semelhantes, as regras aqui desenvolvidas são inéditas no sentido de basearem-se em hipóteses formuladas com base na observação de bandos de pássaros reais, suportadas por diversos trabalhos no campo da biologia. Os resultados obtidos são coerentes com as duas hipóteses que destacam-se como as principais justificativas para a emergência de formações de vôo como as apresentadas ao longo desta dissertação.

Inicialmente, foi considerado um modelo em que os dois fatores destacados por estas hipóteses – a redução do esforço de vôo devida a efeitos aerodinâmicos e a movimentação motivada pela orientação visual – foram utilizados como base para a formulação das regras que regem o comportamento dos pássaros artificiais. Aliadas a um terceiro fator – o desejo inerente dos pássaros pelo vôo em grupos, dados os benefícios deste com relação à proteção contra predadores – as regras levaram a resultados qualitativos que são condizentes com as formações catalogadas por biólogos e comumente observadas em pássaros na natureza. Quantitativamente, a avaliação dos cinco indicadores aqui desenvolvidos permitiu que fosse medida a robustez do modelo, considerando o seu comportamento frente a diversas simulações independentes e a convergência do posicio-

namento dos pássaros artificiais para as formações acima mencionadas.

Embora este modelo tenha apresentado bons resultados, ele é adequado apenas para a simulação de pássaros de grande porte, onde os fluxos de ar gerados pela amplitude das suas asas possuem magnitude significativa, capazes de reduzir o esforço de vôo de pássaros vizinhos. As formações em V e formas semelhantes em grupos de pássaros não são, entretanto, exclusivas aos pássaros de grande porte. Para pássaros de pequeno porte, dado o menor comprimento de suas asas, considerou-se que os fluxos de ar gerados pelos movimentos destas não são suficientes para que o esforço de vôo de pássaros vizinhos seja reduzido. Assim, um conjunto de regras simplificado, onde cada pássaro busca posicionar-se em um ponto que simultaneamente permita o vôo próximo aos demais membros do bando, e ainda assim possibilite que a visão de cada pássaro esteja desobstruída, demonstrou que as formações tradicionalmente observadas na natureza podem ser atingidas, ainda que com menor precisão se comparadas ao modelo que leva em consideração os efeitos aerodinâmicos.

Em outras palavras, dado um “V ideal”, formado por dois segmentos de reta unidos por um vértice, a observação do posicionamento dos pássaros obedecendo ao dois conjuntos de regras permitiu a observação de que no modelo que considera os efeitos aerodinâmicos, a distância dos pássaros às arestas deste “V ideal” é menor do que aquela medida nos pássaros guiados apenas pelo fator da orientação visual. Isso permitiu a observação de que a busca pelo ponto de maior redução do esforço de vôo age como um fator de ajuste no posicionamento dos pássaros, uma vez atingida a formação de vôo.

Desta forma, os resultados obtidos por ambos os modelos propostos parecem estar de acordo com o comportamento previsto pelas duas hipóteses, fortalecendo a consideração anteriormente citada de que os dois fatores provavelmente evoluíram conjuntamente [51].

7.2 Trabalhos futuros

Diversas direções podem ser consideradas para estender o trabalho aqui realizado, seja com relação às simulações do comportamento de bandos de pássaros em formação, seja no que diz respeito à implementação desta. Em termos comportamentais, há

alguns fatores que podem ser agregados à simulação com o objetivo de obter uma maior compreensão sobre certos aspectos do vôo de pássaros em grupo. Dentre estes, a simulação do efeito do esforço de vôo realizado pelos pássaros, em especial o realizado pelos pássaros líderes, pode levar a conclusões interessantes no que diz respeito ao revezamento na liderança que pode ser observado em bandos de pássaros na natureza. Cabe mencionar que fatores sociais devem ser considerados. Supondo-se, por exemplo, um bando de pássaros consistindo de animais adultos e filhotes, é natural supor que os primeiros se mantenham na liderança do grupo, permitindo que a prole tome proveito das posições que requerem menor esforço de vôo.

Cabe ainda analisar, com base nos estudos realizados nas áreas relevantes da biologia, o efeito de fatores como a distância percorrida durante o vôo, comparando o comportamento de bandos em vôos migratórios de longa distância com aqueles em vôos de menor duração, além de quaisquer efeitos que possam ser causados pela escolha do trajeto de vôo. Com a mesma motivação, podem ainda ser considerados fatores externos ao bando, em especial a existência de fenômenos climáticos como rajadas de vento e mudanças na temperatura deste.

No que diz respeito à implementação, a criação de um simulador que permita que os pássaros artificiais movimentem-se em três dimensões poderia levar a novas constatações sobre o comportamento de grupos de pássaros. Embora os mesmos conjuntos de regras aqui desenvolvidos possam ser utilizados, uma simulação tridimensional poderia levar a movimentos mais realistas até que sejam alcançadas as formações finais de vôo, e possivelmente permitiria a observação de formações em que os pássaros alcancem a estabilidade em planos diferentes. Embora pássaros de grande porte voem mais comumente posicionados no mesmo plano dos demais membros do bando, formações de vôo em que estes posicionam-se em diferentes planos são freqüentemente observadas em pássaros de menor porte.

Ainda no que se refere a aspectos de implementação, cabe a observação de que, a despeito do fato de que as regras aqui concebidas são inerentemente distribuídas, a implementação existente para os Algoritmos 1 e 2 é seqüencial. Embora seja relevante mencionar que, para evitar qualquer tipo de comportamento induzido por uma ordem seqüencial de execução, a implementação atual ordena os pássaros artificiais aleatoriamente a cada turno, claramente implementações destes algoritmos que façam

uso de algum dos diversos paradigmas existentes na programação distribuída podem acrescentar valor aos resultados obtidos, em termos de realismo da simulação e de um melhor mapeamento do modelo teórico na implementação de um simulador.

7.3 Considerações finais

É importante ressaltar aqui o aspecto comportamental que motivou o desenvolvimento deste trabalho. Os pássaros artificiais utilizados para simular o fenômeno natural do vôo em formações semelhantes a V's são extremamente simples, pois o objetivo aqui não consiste na realização de simulações realistas das características físicas dos pássaros envolvidos no processo. O que se busca é extrair destes as características de comportamento fundamentais que levam a este fenômeno, criando assim uma abstração onde os aspectos relevantes possam ser observados e analisados. Como expresso por Langton [29], em referência aos trabalhos de Reynolds,

É importante distinguir o status ontológico dos vários níveis de comportamento nesses sistemas. Considerando comportamentos individuais, existe uma clara diferenciação: *boids não* são pássaros, nem mesmo remotamente parecidos com pássaros. Eles não possuem estrutura física coesa, existindo apenas como estruturas de informação – processos – dentro de um computador. Entretanto – e este é o “entretanto” crítico – na esfera comportamental, *bandos de boids e bandos de pássaros são instâncias do mesmo fenômeno: o vôo de bandos em formação.*

Referências Bibliográficas

- [1] A. ABRAHAM AND V. RAMOS, “Web usage mining using artificial ant colony clustering and linear genetic programming”, in *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1384–1391, 2003.
- [2] U. AICKELIN, P. BENTLEY, S. CAYZER, *et al.*, “Danger theory: the link between AIS and IDS?”, in *Proceedings of the Second International Conference on Artificial Immune Systems*, pp. 147–155, 2003.
- [3] J. P. BADGEROW, “An analysis of function in the formation flight of Canada geese”, *The Auk*, vol. 105, pp. 749–755, 1988.
- [4] G. BEAUCHAMP, “Reduced flocking by birds on islands with relaxed predation”, in *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 271, pp. 1039–1042, 2004.
- [5] M. BEDAU, “Artificial life: organization, adaptation and complexity from the bottom up”, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 7, pp. 505–512, 2003.
- [6] M. BEDAU, J. S. MCCASKILL, N. H. PACKARD, *et al.*, “Open problems in artificial life”, *Artificial Life*, vol. 6, pp. 363–376, 2000.
- [7] E. BONABEAU, M. DORIGO, AND G. THERAULAZ, *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Oxford, UK: Oxford University Press, 1999.
- [8] R. A. BROOKS, “Intelligence without representation”, *Artificial Intelligence Journal*, vol. 47, pp. 139–160, 1991.
- [9] R. CALABRETTA, S. NOLFI, AND D. PARISI, *An artificial life model for predicting the tertiary structure of unknown proteins that emulates the folding process.*, pp. 862–875. New York, NY: Springer-Verlag, 1995.
- [10] D. L. CHAO AND S. FORREST, “Information immune systems”, in *Proceedings of the First International Conference on Artificial Immune Systems*, pp. 132–140, 2002.
- [11] D. CLIFF, H. P., AND I. HARVEY, “Explorations in evolutionary robotics”, *Adaptive Behaviour*, vol. 2, pp. 73–110, 1992.
- [12] J. P. CRUTCHFIELD AND M. MITCHELL, “The evolution of emergent computation”, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 92, pp. 10742–10746, 1995.

- [13] C. J. CUTTS AND J. R. SPEAKMAN, “Energy savings in formation flight of pink-footed geese”, *Journal of Experimental Biology*, vol. 189, pp. 251–261, 1994.
- [14] G. W. FLAKE, *The Computational Beauty of Nature: Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1998.
- [15] M. GARDNER, “Mathematical games: the fantastic combinations of john conway’s new solitaire game “life””, *Scientific American*, vol. 223, pp. 120–123, 1970.
- [16] L. L. GOULD AND F. HEPPNER, “The vee formation of Canada geese”, *The Auk*, vol. 91, pp. 494–506, 1974.
- [17] F. R. HAINSWORTH, “Precision and dynamics of positioning by Canada geese flying in formation”, *Journal of Experimental Biology*, vol. 128, pp. 445–462, 1987.
- [18] W. D. HAMILTON, “Geometry for the selfish herd”, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 31, pp. 295–311, 1971.
- [19] K. HARMER, P., P. D. WILLIAMS, G. H. GUNSCH, *et al.*, “An artificial immune system architecture for computer security applications”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 281–291, 2002.
- [20] F. HEPPNER, “Avian flight formations”, *Bird Banding*, vol. 45, pp. 160–169, 1974.
- [21] T. HIGUCHI, M. IWATA, D. KEYMEULEN, *et al.*, “Real-world applications of analog and digital evolvable hardware”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, pp. 220–235, 1999.
- [22] D. HUMMEL, “Aerodynamic aspects of formation flight in birds”, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 104, pp. 321–347, 1983.
- [23] D. HUMMEL, “Formation flight as an energy-saving mechanism”, *Israel Journal of Zoology*, vol. 41, pp. 261–278, 1995.
- [24] H. IBA AND A. MIMURA, “Inference of a gene regulatory network by means of interactive evolutionary computing”, *Information Sciences*, vol. 145, pp. 225–236, 2002.
- [25] J. C. ISSACS, R. K. WATKINS, AND S. Y. FOO, “Evolving ant colony systems in hardware for random number generation”, in *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*, pp. 1450–1455, 2002.
- [26] J. O. KEPHART, “A biologically inspired immune system for computers”, in *Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, pp. 130–139, 1994.
- [27] K. KIM AND S. CHO, “A comprehensive overview of the applications of artificial life”, *Artificial Life*, vol. 12, pp. 153–182, 2006.
- [28] P. KUNTZ, P. LAYZELL, AND D. SNYERS, “A colony of ant-like agents for partitioning in VLSI technology”, in *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, pp. 417–424, 1997.

- [29] C. LANGTON, *Artificial life*. Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1989.
- [30] I. LEBAR BAJEC, “Boids with a fuzzy way of thinking”, in *Proceedings of ASC*, pp. 58–62, 2003.
- [31] I. LEBAR BAJEC, N. ZIMIC, AND M. MRAZ, “Fuzzifying the thoughts of animats”, in *Proceedings of the 10th International Fuzzy Systems Association World Congress*, vol. 2715 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 195–202, 2003.
- [32] I. LEBAR BAJEC, N. ZIMIC, AND M. MRAZ, “Simulating flocks on the wing: the fuzzy approach”, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 233, pp. 199–220, 2005.
- [33] K. LERMAN AND A. MARTINOLI, “A macroscopic analytical model of collaboration in distributed robotic systems”, *Artificial Life*, vol. 7, pp. 375–393, 2001.
- [34] A. LINHARES, “Synthetizing a predatory search strategy for VLSI layouts”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, pp. 147–152, 1999.
- [35] P. B. S. LISSAMAN AND C. A. SHOLLENBERGER, “Formation flight of birds”, *Science*, vol. 168, pp. 1003–1005, 1970.
- [36] B. D. MALAMUD AND D. L. TURCOTTE, “Cellular-automata models applied to natural hazards”, *Computing in Science and Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 42–51, 2000.
- [37] F. MENCZER, R. K. BELOW, AND W. WILLUHN, “Artificial life applied to adaptive information agents”, in *Spring Symposium on Information Gathering from Distributed Heterogeneous Databases*, pp. 128–132, 1995.
- [38] N. MEULEAU AND M. DORIGO, “Ant colony optimization and stochastic gradient descent”, *Artificial Life*, vol. 8, pp. 103–121, 2002.
- [39] M. MITCHELL, *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
- [40] P. S. NGAN, M. L. WONG, W. LAM, *et al.*, “Medical data mining using evolutionary computation”, *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 16, pp. 73–96, 1999.
- [41] S. NOLFI AND D. FLOREANO, *Evolutionary robotics: the biology, intelligence and technology of self-organizing machines*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2000.
- [42] S. NOLFI AND D. FLOREANO, “Synthesis of autonomous robots through evolution”, *Trends in Cognitive Science*, vol. 6, pp. 31–37, 2002.
- [43] N. ONO AND T. IKEGAMI, “Selection of catalists through cellular reproduction”, in *Proceedings of the 8th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, pp. 57–64, 2002.
- [44] E. PACHEPSKY, T. TAYLOR, AND S. JONES, “Mutualism promotes diversity and stability in a simple artificial ecosystem”, *Artificial Life*, vol. 8, pp. 5–24, 2002.

- [45] L. PAGLIARINI, A. DOLAN, F. MENCZER, *et al.*, “ALife meets web: lessons learned”, in *Virtual Worlds*, pp. 156–167, 1998.
- [46] R. S. PARPINELLI, H. S. LOPES, AND A. A. FREITAS, “Data mining with an ant colony optimization algorithm”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 321–332, 2002.
- [47] C. A. PENA-REYES AND M. SIPPER, “Evolutionary computation in medicine: an overview”, *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 19, pp. 1–23, 2000.
- [48] R. PFEIFER AND C. SCHEIER, *Understanding intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press, 1999.
- [49] P. PRUSINKIEWICZ, “Modeling plant growth and development”, *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 7, pp. 79–83, 2004.
- [50] T. S. RAY, “An approach to the synthesis of life”, in *Proceedings of Artificial Life II*, pp. 371–408, 1992.
- [51] J. M. V. RAYNER, “Fat and formation in flight”, *Nature*, vol. 413, pp. 685–686, 2001.
- [52] P. RENDELL, *Turing universality of the game of life*, pp. 513–539. London, UK: Springer-Verlag, 2002.
- [53] M. RESNICK, *Turtles, termites and traffic jams: Explorations in massively parallel microworlds*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1994.
- [54] C. W. REYNOLDS, “Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model”, *Computer Graphics*, vol. 21, pp. 25–34, 1987.
- [55] H. SAYAMA, “Self-replicating worms that increase structural complexity through gene transmission”, in *Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life*, pp. 21–30, 2000.
- [56] P. SEILER, A. PANT, AND K. HEDRICK, “Analysis of bird formations”, in *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1, pp. 118–123, 2002.
- [57] P. SEILER, A. PANT, AND K. HEDRICK, “A systems interpretation for observations of bird V-formations”, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 221, pp. 279–287, 2003.
- [58] K. SIMS, “Evolving 3d morphology and behaviour by competition”, in *Proceedings of the 4th International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, pp. 28–39, 1994.
- [59] M. SIPPER, “A new species of hardware”, *IEEE Spectrum*, vol. 37, no. 3, pp. 59–64, 2000.
- [60] E. H. SPAFFORD, “Computer viruses – a form of artificial life?”, tech. rep., Department of Computer Sciences, Purdue University, 1991.

- [61] J. R. SPEAKMAN AND D. BANKS, “The function of flight formations in greylag geese *Anser anser*; energy saving or orientation?”, *Ibis*, vol. 140, pp. 280–287, 1998.
- [62] A. STAUFFER, M. SIPPER, AND A. PÉREZ-URIBE, “Some applications of FPGAs in bio-inspired hardware”, in *Proceedings of the 6th IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines*, pp. 278–279, 1998.
- [63] T. TAYLOR AND C. MASSEY, “Recent developments in the evolution of morphologies and controllers for physically simulated creatures”, *Artificial Life*, vol. 7, pp. 77–87, 2001.
- [64] D. TERZOPOULOS AND X. TU, “Artificial fishes: physics, locomotion, perception, behavior”, in *Proceedings of ACM SIGGRAPH’94*, pp. 43–50, 1994.
- [65] J. VON NEUMANN, *Theory of Self-Reproducing Automata*. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1966.
- [66] H. WEIMERSKIRCH, J. MARTIN, Y. CLERQUIN, *et al.*, “Energy saving in flight formation”, *Nature*, vol. 413, pp. 697–698, 2001.
- [67] S. WOLFRAM, *A new kind of science*. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002.
- [68] R. ZEBULUM, M. A. PACHECO, AND M. VELLASCO, “Comparison of different evolutionary methodologies applied to electronic filter design”, in *Proceedings of the IEEE: International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 434–439, 1998.