



Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação  
Departamento de Física

Programa de Pós-graduação em Física Aplicada

**Observação experimental de transição de  
fase schools-shoals em peixe-zebra (Danio  
rerio)**

Luis Gomes de Negreiros Neto

Dissertação de Mestrado

Recife - PE  
16 de junho de 2023



Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação  
Departamento de Física

Luis Gomes de Negreiros Neto

**Observação experimental de transição de fase schools-shoals  
em peixe-zebra (*Danio rerio*)**

*Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Física Aplicada do Departamento de Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Física Aplicada.*

Orientador: Prof. Dr. Anderson Luiz da Rocha e Barbosa  
Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Rodrigues de Castro Romaguera

Recife - PE  
16 de junho de 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- N385o Negreiros Neto, Luis Gomes de  
Observação experimental de transição de fase schools-shoals em peixe-zebra (*Danio rerio*) / Luis Gomes de Negreiros Neto. - 2023.  
73 f. : il.
- Orientador: Anderson Luiz da Rocha e Barbosa.  
Coorientador: Antonio Rodrigues de Castro Romaguera.  
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada, Recife, 2023.
1. Comportamento coletivo. 2. Matéria ativa. 3. Sistemas Físicos de não-equilíbrio. 4. Cardumes de peixes. 5. Transições de fase. I. Barbosa, Anderson Luiz da Rocha e, orient. II. Romaguera, Antonio Rodrigues de Castro, coorient. III. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADA

**Observação experimental de transição de fase schools-shoals  
em peixe-zebra (*Danio rerio*)**

*Luis Gomes de Negreiros Neto*

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Física, defendida e aprovada por unanimidade em 16/06/2023 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

---

Prof. Dr. Anderson Luiz da Rocha e Barbosa  
UFRPE

Co-orientador:

---

Prof. Dr. Antonio Rodrigues de Castro Romaguera  
UFRPE

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Pabyton Gonçalves Cadena  
UFRPE

---

Prof. Dr. Clécio Clemente de Souza Silva  
UFPE

*“Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida, e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto, porque o mundo tentará te dissuadir.”*

Friedrich Nietzsche

Dedico esta conquista, assim como todas as demais, a todos que estiveram ao meu lado e me apoiaram durante esses momentos.

# Agradecimentos

A mim mesmo, por não desistir.

Aos meus pais, por me apoiarem nesse caminho por mais difícil que seja às vezes, aos meus tios, por me ajudarem durante os períodos de viagem.

A minha avó Maria J. de Amorim (*in memoriam*), por todos os seus ensinamentos e conselhos.

Aos meus amigos Antonio Bernardo (menino de sapé), José Dias (o gigante), Diego Bruno (David Luiz), Ana Sofia (vegetariana), João Mario (o cabra dos programas), Marcos André (Piauí), Vinícius Farah (comunista), Fernando Augusto (mente demais), Luan Moraes (rico), Lucas Leandro (um dos 7), Luidje Daniel (aprendiz de Fernando), Eudes Lucas (cliente da Nike), Yago Pontual (ogay), Pedro Lourenço (sim), Ruam Quirino (salamaleico), Thiago Castro (é feio viu), que conheci ao longo do mestrado, agradeço por compartilharem diversos momentos comigo e por me ajudarem a transportar água do laboratório de Biologia para o LaSCoU em dias de experimento. Poder criar e compartilhar histórias com vocês tornou essa trajetória menos difícil de enfrentar. Agradeço especialmente a João Victor (a máquina) por me ajudar durante a pesquisa no mestrado, tirando muito do seu tempo para esclarecer minhas dúvidas. Foram muitos dias difíceis transportando peixes, realizando experimentos e fazendo análises, mas também tive o prazer de compartilhar muitos bons momentos com todos vocês.

A minha namorada Ticiany, por sempre me apoiar e estar presente nessa jornada. Aos meus amigos do curso de graduação que também ingressaram no mestrado: Damião Franceilton, Ladedson Luan, Nallyson William, Reinaldo Freire, Raline Araújo e Max Wendell. A Alexandre e Anailde por me acolherem em sua casa e me ajudarem durante os primeiros meses em Recife. Agradeço também aos demais amigos que conheci na graduação e aos colegas com quem compartilhei o ap 201, que sempre me apoiaram nesses momentos.

A todos os professores que tive o prazer de conhecer e que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica, pessoal e profissional. Em particular, ao meu orientador Anderson Luiz e ao meu coorientador Antonio Romaguera por todas as orientações e ensinamentos ao longo do curso. Agradeço também ao professor Pabyton Gonçalves e ao pesquisadores do LECA por ter disponibilizado os peixes utilizados nesta pesquisa e por contribuir com todos os conhecimentos biológicos que foram fundamentais para a realização de um excelente trabalho.

Aos membros da banca examinadora por aceitar julgar este trabalho e pelas contribuições fornecidas.

Por fim, agradeço à Universidade Federal Rural de Pernambuco, ao Programa de Pós Graduação em Física Aplicada - PPGFA pelo suporte físico e a Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEP pelo suporte financeiro.



# Resumo

O comportamento coletivo da matéria ativa abrange uma ampla diversidade existente de seres vivos, podendo ser observado desde sistemas microscópicos até sistemas em grande escala. Tais sistemas são reconhecidos por seus indivíduos possuírem a capacidade de transformar energia interna ou do ambiente em movimento, caracterizando-se como sistemas físicos fora do equilíbrio. Um exemplo interessante de ser observado são grupos de peixes que fazem uso de trocas de informações entre os indivíduos que compõem o grupo para desenvolver benefícios energéticos, anti-predatórios e na busca por alimentos. A partir de decisões individuais, surgem padrões coletivos de estruturas em grande escala que podem ser analisados quantitativamente. Porém, grande parte das definições que abordam o surgimento desses padrões, como as estruturas de schools e shoals, em grande maioria, são baseadas em critérios conceituais de sociabilidade. Neste trabalho, analisamos a transição de fase de grupos de peixe-zebra, através da variação da densidade. Para tanto, utilizamos câmeras de vídeo para capturar a posição e velocidade de peixes-zebra em um ambiente controlado. Consideramos um recipiente circular com 50 cm de diâmetro e uma lâmina d'água de 5 cm, realizamos o rastreamento das trajetórias dos peixes-zebra, variando o número de indivíduos  $N$ . Em seguida, investigamos as medidas de correlação dos peixes a partir das derivadas dos parâmetros de polarização, agregação e D-centroide utilizados neste trabalho, entre as séries temporais para grupos de  $N = 2, 13$  e 30 indivíduos, por meio do parâmetro  $q$ -gaussiano que serviram para reforçar transições de fase schools-shoals dos peixes-zebra. Assim, conseguimos caracterizar uma transição de fase entre os grupos de peixes através dos valores médios das séries temporais dos parâmetros de polarização, agregação e D-centroide, influenciada pela variação da densidade. Além disso, verificamos uma variação na correlação dos peixes através das flutuações destes mesmos parâmetros. Com os dados experimentais destes parâmetros, conseguimos quantificar o comportamento de school e shoal durante nossas análises.

**Palavras-chave:** Comportamento coletivo, Matéria ativa, Sistemas Físicos de não-equilíbrio, cardumes de peixes, Transições de fase.



# Abstract

The collective behavior of active matter encompasses a wide diversity of existing living organisms, ranging from microscopic systems to large-scale systems. Such systems are recognized by their individuals having the ability to transform internal or environmental energy into movement, characterizing them as out-of-equilibrium physical systems. An interesting example to observe is groups of fish that make use of information exchange between the individuals that make up the group to develop energetic, anti-predatory, and food-seeking benefits. From individual decisions, collective patterns of large-scale structures emerge that can be quantitatively analyzed. However, most of the definitions that address the emergence of these patterns, such as the structures of schools and shoals, are based on conceptual criteria of sociability. In this work, we analyze the phase transition of zebrafish groups, through the variation of density. To do so, we used video cameras to capture the position and velocity of zebrafish in a controlled environment. We considered a circular container with a diameter of 50 cm and a water depth of 5 cm, tracking the trajectories of zebrafish, varying the number of individuals  $N$ . Then, we investigated the correlation measures of the derivatives of the polarization, aggregation, and D-centroid parameters used in this work, between the time series for groups of  $N = 2, 13,$  and  $30$  individuals, using the q-gaussian parameter that served to reinforce schools-shoals phase transitions of zebrafish. Thus, we are able to characterize a phase transition between fish groups through the average values of the time series of polarization, aggregation, and D-centroid parameters, influenced by density variation. In addition, we observed variation in the correlation between fish through the fluctuations of these same parameters. With the experimental data of these parameters, we were able to quantify the behavior of schools and shoals during our analyses.

**Keywords:** Collective Behavior, Active matter, Non-equilibrium Physical systems, Fish schools, Phase transitions.



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Física da Matéria Ativa</b>	<b>5</b>
2.1	Partículas Auto-Propelidas	5
2.2	Comportamento coletivo em Sistemas de Matéria ativa e Interações com o Ambiente	6
2.3	Propiedades de Interações	7
2.3.1	Alinhamento / Polarização	8
2.3.2	Agregações de Partículas	10
2.3.3	D-Centroide	12
2.4	<i>School vs Shoal</i>	13
2.5	Modelos de Matéria Ativa	15
2.5.1	Modelo de Reynolds	15
2.5.2	Modelo de Vicsek	16
2.5.3	Modelo S&M	18
<b>3</b>	<b>Análise Experimental</b>	<b>19</b>
3.1	<i>Danio rerio</i> (Zebrafish)	19
3.1.1	Reprodução em Laboratório	21
3.2	Aparato Experimental	22
3.2.1	Procedimentos Experimentais	25
<b>4</b>	<b>Resultados e Análises</b>	<b>29</b>
4.1	Polarização	29
4.2	Agregação	35
4.3	D-centroide	39
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>47</b>



# Lista de Figuras

1.1	Exemplos de comportamento coletivo.	2
2.1	Representação gráfica da polarização de acordo com a equação 2.1, para um experimento com $N = 10$ peixes. A representação segue os valores reais atribuídos ao aquário com $r = 25cm$ e centralizados nas coordenadas $(0,0)$ .	9
2.2	Imagem de uma realização experimental com $N = 20$ . A imagem destaca uma das possibilidades onde os peixes apresentam direções opostas, resultando no cancelamento dos vetores $\vec{v}_i$ .	10
2.3	O círculo azul representa o limite das bordas do recipiente de raio $R = 25cm$ , e o círculo vermelho envolvendo os peixes representa o círculo de agregação de raio $R_a$ , onde $R_a \in [0, R]$ .	11
2.4	Imagem vertical de uma representação do D-centroide com $N = 10$ . O círculo azul representa os limites das bordas do aquário. A semi reta vermelha liga o centro de massa do grupo ao ponto mais próximo da borda, ambos representados por círculos vermelho.	13
2.5	Evolução comportamental de animóides ( $N = 300$ em todas as situações) sob a dinâmica do modelo de Vicsek, apresentando em uma sequência de 20 passos de cada animóide para uma variação de parâmetros.	17
3.1	Danio rerio adulto com aproximadamente 1 ano e 7 meses de vida. Os indivíduos utilizados pertencem ao Laboratório de Ecofisiologia e Comportamento Animal (LECA).	20
3.2	Estrutura utilizada para reprodução do <i>Danio rerio</i> no biotério	22
3.3	Primeira estrutura experimental montada no Laboratório de Sistemas Complexos e Universalidades ( <i>LaSCoU</i> ) para a realização dos registros das trajetórias dos peixes.	23
3.4	Conjunto de câmera e lentes utilizadas para captura de imagens do <i>Danio rerio</i> .	24
3.5	Montagem definitiva usada durante a realização dos experimentos.	25
3.6	Aquário usado para transporte dos peixes.	26
3.7	Interface do IdTracker.	27
3.8	Captura de um quadro referente ao vídeo do processamento de identificação e rastreamento do IdTracker.	28
4.1	PDF da polarização para todos os $N$ grupos analisados.	29
4.2	Gráficos das PDFs da polarização usadas para comparação com nossos resultados.	30

- 4.3 (a) Imagem vertical do experimento para  $N = 2, 13, 30$  peixes no tanque de raio igual a 25cm. (b) Trajetórias dos peixes por 3s. (c) Série temporal de polarização. 31
- 4.4 Gráfico log-log da polarização média (círculos vazados), ajustes leis de potência (linhas sólidas), para  $N = 2, 3, 5, 8, 10$  e  $13$  (linha azul),  $N = 13, 15, 18, 20, 25$  e  $30$  (linha vermelha). Os ajustes acompanha sua respectiva barra de erro em uma faixa larga de mesma cor do ajuste correspondente. 32
- 4.5 Histograma da  $\delta P$  para os grupos com  $N = 2, N = 13$  e  $N = 30$ . 33
- 4.6 Gráfico das PDF de  $\delta P$  para  $N = 2$  (círculos pretos),  $N = 13$  (círculos vermelhos) e  $N = 30$  (círculos verdes). As linhas sólidas representam a distribuição q-gaussiana que melhor se ajusta ao pontos (cada linha e círculos correspondentes do valor de  $N$ , são representados pela mesma cor). 34
- 4.7 Gráfico das PDF da agregação para todos os  $N$  grupos analisados. 36
- 4.8 Gráfico log-log das agregações médias (círculos vazados) para os  $N$ -grupos em função da densidade  $\rho$ . As linhas sólidas representam ajustes de lei de potência. Para  $N = 2, 3, 5, 8, 10$ , linha azul e  $N = 10, 13, 15, 18, 20, 25, 30$ , linha vermelha. Cada ajuste acompanha sua respectiva barra de erro (obtidas através do desvio padrão das séries) em faixas largas com tons mais claros de suas cores. 37
- 4.9 Histograma da  $\delta A$  para os grupos com  $N = 2, N = 13$  e  $N = 30$ . 38
- 4.10 Gráficos das PDF da  $\delta A$  para  $N = 2$  (círculos pretos),  $N = 13$  (círculos vermelhos) e  $N = 30$  (círculos verdes). As linhas sólidas representam a q-gaussiana que melhor se ajusta aos pontos. 39
- 4.11 Gráfico das PDF do D-centroide para todos os  $N$  grupos analisados. 40
- 4.12 Gráfico log-log dos D-centroides médios (círculos vazados) para todos os  $N$  analisados, em função de  $\rho$ . As linhas sólidas representam ajustes de lei de potência com melhor ajuste. Para  $N = 2, 3, 5, 8, 10, 13$ , linha azul e  $N = 13, 15, 18, 20, 25, 30$ , linha vermelha. Cada ajuste acompanha sua respectiva barra de erro (obtidas a partir do desvio padrão das séries temporais) em faixas largas com tons mais claros de suas cores. 41
- 4.13 Histograma da  $\delta D$  para os grupos com  $N = 2, N = 13$  e  $N = 30$ . 42
- 4.14 Gráfico das PDF do  $\delta D$  para  $N = 2$  (círculos pretos),  $N = 13$  (círculos vermelhos) e  $N = 30$  (círculos verdes). As linhas sólidas representam a q-gaussiana que melhor se ajusta aos pontos. 43
- 4.15 Gráfico dos valores de  $q$  das distribuições dos ajustes q-gaussiano em relação ao número de peixes  $N$ . 44

## Lista de Tabelas

4.1	Valores dos ajustes q-gaussiano com melhor $R^2$ sob os pontos experimentais dos incrementos da polarização com $N = 2, 13, 30$ indivíduos.	35
4.2	Valores dos ajustes q-gaussiano com melhor ajuste sob os pontos experimentais dos incrementos da agregação com $N = 2, 13, 30$ indivíduos.	39
4.3	Valores do parâmetro $q$ obtidos por meio de ajustes da q-gaussiana com melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) atribuído às curvas sob os pontos experimentais dos incrementos do D-centroide para diferentes tamanhos de grupo de peixes ( $N$ ).	43

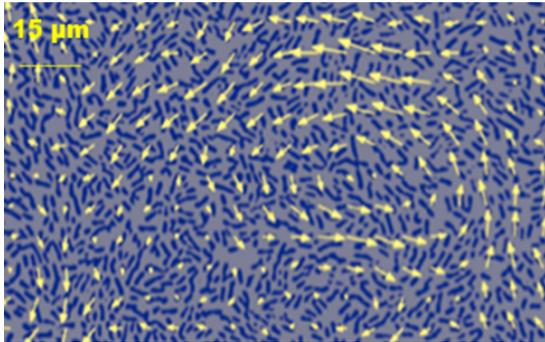


## Introdução

A Física é uma ciência natural que busca descrever e explicar os fenômenos físicos que ocorrem no universo, desde as partículas subatômicas até as galáxias inteiras. Segundo [89], “a Física estuda as leis que governam o universo, buscando compreender os mecanismos pelos quais a natureza se manifesta e interage consigo mesma”. A Física é amplamente dividida em diversas áreas de estudo, que incluem a Mecânica, Termodinâmica, Estatística, Óptica, e outras diversas áreas e subáreas, como por exemplo a matéria ativa. Conforme [29], essas áreas da Física são fundamentais para a compreensão de como a natureza funciona em suas diversas escalas.

A matéria ativa é um campo interdisciplinar da Física que abrange várias áreas de estudo, incluindo a Mecânica Estatística, a Física de Fluidos e a Física de Sistemas Complexos. De acordo com [46, 63], a matéria ativa se refere a sistemas físicos que são capazes de realizar trabalho ou gerar movimento a partir de uma fonte de energia interna, como realizado por células biológicas, enxames de animais e robôs móveis. Em animais, o movimento e as interações entre os membros de uma espécie podem influenciar no comportamento dos indivíduos, gerando comportamento sincronizado e formando um organismo coletivo. Esses comportamentos coletivos são bastante presentes em nosso cotidiano e nos possibilitam a oportunidade de presenciar um fenômeno deslumbrante aos olhos humanos. Para isso, basta observarmos com atenção a natureza ao nosso redor. Como exemplos, podemos citar a distribuição de bactérias, figura 1.1a, o voo de garças brancas ao entardecer, figura 1.1b, cardumes de peixes em mar aberto, figura 1.1c, e até mesmo o comportamento humano em conglomerados [92], como em uma plataforma de metrô lotada ou alguma avenida movimentada, figura 1.1d.

Considerando como exemplo a figura 1.1c, observamos a formação de um grupo de peixes, onde cada um dos indivíduos naturalmente deverá metabolizar o alimento consumido para produzir sua própria energia para se deslocar, além de receber e transmitir informações com os vizinhos, sendo essas propriedades fundamentais para a formação de grupos e movimento coletivo. Apesar de se moverem independentemente um dos outros, o grupo tende a manter uma distribuição espacial coerente e específica, o que resulta na maioria das vezes em movimentos complexos. Entretanto, esses movimentos podem ser descritos pela formação espacial que o grupo adota e pelas interações entre os indivíduos que compõem o coletivo [59, 17, 34]. Estudos ainda verificaram que algumas espécies de peixes tendem a ter preferência em se alinhar e tomar como referência uma quantidade específica de vizinhos próximos [64, 78, 43]. A partir dessas regras, torna-se possível a formação de movimento coletivo entre animais. Os peixes, através dessas interações podem apresentar mudanças na organização ou estrutura do sistema, podendo ser descrito por diferentes estados que ocorrem quando um parâmetro como temperatura, pressão ou densidade, é variado de forma a induzir uma mudança de fase. Esses parâmetros ou parâmetros de ordem são quantidades físicas que descrevem o estado de um sistema físico ou de outra natureza, onde cada estado do sistema é representado por valores específicos de seus parâmetros de ordem e a mudança de um estado para outro, é caracterizado



(a) Dinâmica de fluidos da turbulência bacteriana. Retirado de [2].



(b) Grupo de garças brancas voando em formação "V". Retirado de [42].



(c) Grupo de peixes nadando de forma organizada e agregada. Retirado de [40].



(d) Plataforma de metrô superlotada em horário de pico. Retirado de [22].

Figura 1.1: Exemplos de comportamento coletivo.

como uma transição de fase. Em grupos de peixes, dependendo da situação, um estado pode ser mais organizado e coeso, ou mais caótico e desorganizado.

A partir da variação do valor médio de parâmetros de ordem como polarização, agregação e D-centroide, características como transições de fase entre comportamentos de *school* e *shoal*, podem ser analisados quantitativamente. Sendo um grupo com comportamentos de *school*, um grupo organizado em que os peixes nadam juntos de forma coordenada e estável, enquanto um *shoal* é um grupo menos estruturado em que os peixes compartilham um espaço comum, mas não nadam necessariamente em uma direção coordenada. A mudança desses estados podem ocorrer de forma contínua ou descontínua, dependendo da natureza da mudança na dinâmica do grupo em resposta a estímulos externos, como a variação de densidade, interação com indivíduos próximos, presença de predadores, etc. No caso de uma transição de fase contínua, a mudança ocorre gradualmente, sem uma alteração brusca nas propriedades do sistema. Já em uma transição descontínua, a mudança ocorre abruptamente, com uma mudança marcante nas propriedades do sistema, como energia, entropia, estrutura e organização.

Um dos modelos mais populares para estudar a matéria ativa é o modelo de Vicsek [86]. Nesse modelo, as partículas se movem em um espaço bidimensional e interagem com seus vizinhos próximos seguindo regras simples de alinhamento de movimento. O modelo de Vicsek

tem sido amplamente utilizado para simular o comportamento de diferentes sistemas biológicos, e buscar compreender a transição entre os padrões comportamentais formados. O estudo de transições de fase em comportamento coletivo é um tópico de grande interesse em física estatística e física de sistemas complexos. De acordo com a pesquisa [87], mudanças abruptas no comportamento coletivo podem ocorrer em resposta a pequenas mudanças nos parâmetros do sistema. Essas mudanças abruptas no comportamento coletivo, chamadas de transições de fase podem ser descritas por diferentes estados.

Conforme destacado por [7], em muitos casos, é difícil prever quando uma transição de fase ocorrerá e quais as características do novo estado emergente. Além disso, outro desafio importante é entender como os indivíduos que compõem o sistema contribuem para a transição de fase. Em sistemas de matéria ativa, por exemplo, os indivíduos podem interagir uns com os outros por meio de regras de movimentos locais, e essas interações locais podem levar a padrões coletivos emergentes, como em grupos de peixes. A compreensão de como essas interações locais levam a transições de fase é um problema em aberto e objeto de estudo em muitas áreas da física, como destacado em [46]. Por fim, outro problema importante em transições de fase em comportamento coletivo é entender como essas transições afetam as propriedades macroscópicas do sistema. Em sistemas biológicos, por exemplo, as transições de fase podem levar a mudanças no comportamento de uma população de indivíduos, o que pode ter implicações importantes em termos de sobrevivência e evolução [14].

Uma das motivações para desenvolver esta pesquisa foi o trabalho publicado [81] que analisou o comportamento coletivo de cardumes de *Parapristipoma trilineatum* em um tanque circular com 90cm de raio, contendo uma lâmina d'água de 15cm de espessura e uma coluna central com 15cm de diâmetro. A pesquisa foi realizada utilizando análise de vídeo e modelagem matemática [47]. O objetivo foi investigar o comportamento bidimensional dos peixes de acordo com a variação do número de indivíduos no tanque de testes, em grupos de 1, 3, 5, 10 e 25 peixes, afim de avaliar quantitativamente o comportamento escolar e validar o modelo matemático utilizado.

O artigo [43] também foi utilizado como motivação, onde um modelo computacional e robótico foi empregado para estudar as interações entre indivíduos em cardumes de *Hemigrammus rhodostomus*. Os autores buscaram identificar as combinações mais simples e eficientes de interações individuais que levariam à formação complexa de cardumes coesos e organizados a partir de um conjunto relativamente simples de interações entre os indivíduos. Além disso, os autores também identificaram a importância de certos tipos de interações, como a tendência dos peixes a se alinhar com seus vizinhos mais próximos. Para tanto, foi utilizado um tanque circular com 25cm de raio, lâmina d'água de 7cm e grupos de peixes com 5 indivíduos escolhidos aleatoriamente.

Assim como o artigo do Miller e Gerlai [51], que aborda a análise do comportamento coletivo do *Danio rerio* (peixe-zebra), particularmente, as diferenças entre dois tipos de comportamento: *Schooling* e *Shoaling*. A análise foi realizada sob condições controladas em um tanque circular com 91cm de diâmetro, contendo uma lâmina d'água de 10cm de espessura e utilizando grupos com 5, 10, 20 e 50 indivíduos, buscando entender como esses peixes se organizam em grupos e se movimentam em conjunto. Os experimentos contavam com câmeras de vídeo para analisar o comportamento dos peixes em diferentes situações, que serviram para medir as pro-

priedades da movimentação coletiva dos peixes, como velocidade média e a distância entre os indivíduos. Os resultados mostraram que os peixes-zebra que formavam comportamento *school* exibiam maior coerência e organização do que os indivíduos que apresentavam comportamentos *shoal*. Além das propriedades do comportamentos *school* serem mais estáveis do que as *shoal*.

Portanto, diante das pesquisas citadas, e apesar da variedade de sistemas que são englobados e estudados na área de matéria ativa encontrados na literatura, foi notado uma carência de pesquisas experimentais que abordam transições de fase em comportamento coletivo de sistemas macroscópicos que façam uso do peixe-zebra e que forneçam análises por meio de medidas que descrevem a organização e a estrutura do sistema, como por exemplo, através dos valores médios dos parâmetros de ordem de polarização, agregação, D-centroide e por meio do parâmetro q-gaussiano, usado para verificar a função de correlação entre as flutuações das séries temporais, sendo a correlação, a medida estatística que quantifica o grau de relação entre duas ou mais variáveis. Aplicadas ao parâmetro q-gaussiano, podem ser usadas para investigar a existência de correlações de longo alcance em um conjunto de dados, podendo ser interpretada como um indicativo da presença de comportamento coletivo através de interações entre os peixes do grupo. Neste trabalho, analisamos experimentalmente a estatística das trajetórias de grupos de peixe-zebra a partir da variação de densidade do sistema.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2, realizamos uma abordagem sobre matéria ativa e partículas autopropelidas (do inglês, *self-propelled particles* - *SPPs*), incluindo suas propriedades, definições de *school* e *shoal*, assim como uma breve abordagem sobre modelos de matéria ativa. No Capítulo 3, apresentamos os procedimentos experimentais utilizados e descrevemos as características da espécie de peixe usada em nosso experimento. No Capítulo 4, apresentamos os resultados adquiridos por meio das análises experimentais. Por fim, no Capítulo 5, estão as conclusões da pesquisa.

## Física da Matéria Ativa

### 2.1 Partículas Auto-Propelidas

As *SPPs* são sistemas que se movem de forma autônoma em resposta a estímulos internos ou externos, sem a necessidade de uma força externa aplicada, ou seja, sua principal característica é que elas são compostas de unidades autoimpulsionadas, partículas ativas, cada uma capaz de converter energia livre, seja ela armazenada ou ambiente, em movimento sistemático [72, 45]. Essas partículas podem ser feitas de diferentes materiais, como polímeros, metais ou materiais híbridos, além de praticamente todos os seres vivos serem dotados com propriedades de autopropulsão. Essa propriedade pode ser utilizada em uma ampla gama de aplicações, incluindo diagnóstico médico, remediação ambiental e transporte de cargas em sistemas biológicos e não biológicos [46]. Em sistemas macroscópicos, estas partículas podem ter uma grande influência no comportamento do sistema como um todo, resultado da sua capacidade de gerar fluxos e correntes, bem como a habilidade de se agrupar ou separar, levando ao aparecimento de padrões coletivos [63].

Os sistemas de interesse para nós são os processos biológicos que ocorrem em escalas macroscópicas, e alguns desses sistemas podem ser encontrados em eventos cotidianos, tais como a migração de bandos de aves como as avoantes (*Zenaida auriculata*), que voam grandes distâncias em bando, desde regiões da América Central até o nordeste do Brasil. Além disso, existem algumas espécies de peixes ornamentais, como o Neon Cardinal (*Paracheirodon axelrodi*), comumente usados na decoração de aquários, que costumam viver em grupos e apresentam comportamento coletivo.

Organismos como as aves e os peixes mencionados, além de outros similares podem apresentar uma forte relação entre as ações individuais de cada indivíduo e o comportamento coletivo. Em outras palavras, ações individuais como movimento, direção e velocidade estão relacionadas entre si e influenciam diretamente as ações dos outros indivíduos. É essa forte relação entre as ações individuais de cada membro de um aglomerado que permite que esses organismos apresentem comportamentos coletivos. Por exemplo, em um cardume, se um indivíduo desse cardume muda de direção, os vizinhos próximos a ele também tendem a mudar, e essa mudança de direção pode se propagar por todo o cardume. Isso ocorre porque as ações individuais de cada peixe estão correlacionadas com as ações dos outros peixes, e essa correlação leva à formação de comportamento coletivo. As propriedades de movimento, direção e velocidade podem ser definidas como parâmetros de ordem, já que podem ser usados para descrever um estado comportamental apresentado pelos indivíduos e, com isso, compreender o comportamento coletivo que emerge a partir das correlações, sendo usados para investigar o surgimento de movimento auto-ordenado neste trabalho.

Apesar de não ser o ponto de interesse abordado neste trabalho, também é interessante citarmos exemplos de sistemas microscópicos de partículas ativas, em sistemas biológicos como

bactérias e células, que possuem a capacidade de autopropulsão devido à sua atividade metabólica, e em sistemas sintéticos, como partículas rod-like, que são objetos espacialmente estendidos que apresentam movimento persistente em ambiente flutuante e dissipativo, onde suas interações com propriedades repulsivas de curto alcance são determinadas pela sua forma [23, 6]. É importante lembrar que os primeiros estudos com *SPPs* foram realizadas por meio de observações em colônias de bactérias, estudadas pelo físico húngaro, Tamas Vicsek (1952 - ), conhecido por suas contribuições à compreensão da dinâmica de sistemas complexos e comportamento coletivo de partículas ativas.

Ao estudar as *SPPs* em sistemas macroscópicos, os cientistas estão interessados em compreender como as interações entre as partículas, bem como as interações entre as partículas e o ambiente, afetam o comportamento coletivo. Essas interações indicam que as partículas tendem a se mover juntas em padrões específicos, como aglomerados, vórtices ou ondas, podendo afetar a dinâmica do sistema, como taxa de coesão, direção de autopropulsão e a capacidade de se mover através de obstáculos [46]. Além disso, essas interações também podem resultar em tensão mecânica, que é a força que as partículas exercem uns sobre os outros e sobre o meio que as cerca, resultando em um comportamento complexo durante o processo de transição de fase [76]. A investigação nesta área de estudo pode conduzir ao avanço de novos materiais e tecnologias, incluindo a concepção de partículas inteligentes que podem desempenhar funções específicas. Em resumo, o estudo de *SPPs* em sistemas macroscópicos constitui uma área interdisciplinar que integra conceitos de física, química, biologia e engenharia para compreender e manipular o comportamento coletivo dessas partículas.

## 2.2 Comportamento coletivo em Sistemas de Matéria ativa e Interações com o Ambiente

O comportamento coletivo é resultado de interações entre indivíduos e o meio ambiente, ou entre indivíduos de um grupo que buscam alguma vantagem em particular, desenvolvendo propriedades conjuntas. Contudo, esses indivíduos também são dotados de suas próprias características individuais que podem influenciar no comportamento de seus vizinhos. Quando esses indivíduos passam a ser influenciados, cria-se um efeito crescente de agentes conectados entre si, ocasionando o surgimento de padrões comportamentais complexos. Esses padrões não podem ser previstos apenas observando-se as propriedades dos comportamentos individualmente, devido às interações não-lineares que podem ser uma forte influência na dinâmica do grupo [39].

Em várias espécies de peixes, a genética também desempenha um papel importante na capacidade de um peixe em responder a estímulos ambientais e se mover de forma autônoma [19]. No entanto, o comportamento de um cardume também é resultado da interação social entre seus membros, associado ao fato de que os peixes tendem a seguir o movimento de seus vizinhos [58, 75, 43]. Indivíduos da mesma espécie geralmente vivem em grupos por possuírem características e necessidades semelhantes, o que os torna mais eficientes em sua sobrevivência e reprodução.

Outro fator que influencia significativamente no comportamento e estrutura de grupos de

peixes, é o comportamento de seguir a borda em aquários ou permanecer em regiões de margens, também conhecido como “*efeito edge-following*” [74]. Frequentemente observado em alguns grupos de peixes, tanto em áreas naturais quanto em experimentos controlados, consiste no deslocamento dos peixes ao longo das bordas de recifes de corais, plantas aquáticas, ou paredes e obstáculos [62]. Em áreas naturais, o comportamento de seguir a borda pode ser explicado por uma combinação de fatores, incluindo proteção contra predadores, busca por alimento, refúgio ou orientação em ambientes com pouca visibilidade [74]. Em experimentos controlados, como aquários e tanques, o comportamento de seguir a borda pode ser afetado pela iluminação excessiva, ambientes desconhecido pelos indivíduos e falta de abrigo, influenciando no aumento de ansiedade e causando a tigmotaxia [65]. Os peixes passam a frequentar regiões mais próximas à borda enquanto não se familiarizam com o ambiente e a iluminação utilizada, esse período de adaptação chamamos de aclimação.

Em resumo, o comportamento coletivo de peixes é influenciado por uma combinação de diversos fatores, como as interações entre indivíduos, comportamento autônomo e efeitos do ambiente, incluindo o “*efeito edge-following*” e a tigmotaxia, abordados nesta seção, porém o comportamento coletivo é formado por uma ampla e complexa variedades de interações entre indivíduos e meio ambiente, onde ambos influenciam de forma simultânea, relacionados em um continuum entre processos individuais e coletivos. Nas seções a seguir serão abordados alguns parâmetros de ordem que se fazem presentes em comportamentos coletivos de animais e que foram usados como ferramentas de análise na elaboração deste trabalho. Os parâmetros revisados aqui não serão utilizados para explicar os mecanismos e causas que ocasionam a formação de grupos que apresentam comportamentos de *school* ou *shoal*, mas sim descrever esses comportamentos de forma quantitativa e conecta-los com algumas propriedades de características individuais e coletivas.

## 2.3 Propiedades de Interações

Embora a persistência do movimento seja uma das características mais notáveis da vida [64], nos últimos anos, foram descobertos diversos sistemas físicos e químicos que exibem “indivíduos” auto-propulsores e interativos, sendo eles dotados de características próprias, abrangendo sistemas vivos e não-vivos, onde estes mantêm sua dinâmica através de algum tipo de interação [64, 19].

As interações sociais são essenciais para muitas espécies de animais, incluindo peixes. A forma como os peixes interagem uns com os outros pode ter impacto significativo em seu sucesso reprodutivo, sobrevivência e bem-estar geral. A explicação padrão de como esses grupos se formam e funcionam é que os animais individuais interagem por meio de atração, repulsão e alinhamento, além de outras propriedades de interação como agregação em grupos, comunicação entre indivíduos, estabelecimento de uma hierarquia social, competição por recursos, cooperação em tarefas e coordenação de movimentos. Essas interações podem ser influenciadas por fatores ambientais, como disponibilidade de alimento e presença de predadores, bem como por características individuais, como a personalidade de cada peixe, onde essas propriedades são propostas para conduzir o movimento coletivo [78].

Neste contexto, três importantes propriedades das interações em grupo serão abordadas a

seguir: o alinhamento de indivíduos, a agregação e o deslocamento do centro de massa do grupo. O alinhamento de indivíduos refere-se à capacidade dos peixes se moverem em harmonia, de modo que a direção de cada indivíduo seja influenciada pelos seus vizinhos. A agregação, por sua vez, é a formação de cardumes coesos de indivíduos que permanecem em distâncias próximas de seus vizinhos por uma variedade de razões, tais como a redução do risco de predação ou a obtenção de alimento. Por fim, o deslocamento do centro de massa é a tendência dos peixes a se movimentarem juntos, como se fossem um único organismo, e é influenciado pelo comportamento de cada indivíduo e pelas propriedades físicas do ambiente em que se encontram. O estudo dessas propriedades pode ser valioso para compreendermos melhor como os peixes interagem em grupo e como isso pode afetar seu comportamento e ecologia [75].

### 2.3.1 Alinhamento / Polarização

O primeiro parâmetro a ser analisado nesse trabalho é a polarização. Usado em campos da física, como a spintrônica e estudos em transição de fase de não-equilíbrio em sistemas quântico de spin induzida por laser, ou ainda em nossa área de interesse, a matéria ativa [82]. Porém é abordada frequentemente de forma simples quando falamos de ondas eletromagnéticas, ainda mais quando nos referimos à luz. Entretanto, o fenômeno de polarização se expande além do reino das cores e das intensidades, sendo utilizados para vários propósitos ecológicos, como por exemplo a orientação de indivíduos para reconhecimento de objetos e comunicação [54].

Estudos no campo da biologia mostraram que vertebrados apresentam comportamentos naturais que seguem os mesmos princípios de definição da polarização da luz. Esse mesmo comportamento pode ser observado em seres vivos de mesma espécie que convivem em grandes grupos[54]. Ao observar indivíduos que tendem a se alinhar e/ou seguir na mesma direção de seus vizinhos em situações de fuga ou na busca por alimento, nota-se as interações mútuas entre os indivíduos que compõe o grupo.

O alinhamento, ou polarização como será chamado daqui pra frente, é um comportamento quase que universal entre os sistemas de matéria ativa. Esse comportamento envolve a orientação de animais, bactérias, células e até alguns sistemas sintéticos, em relação a algum estímulo ambiental, como a luz polarizada do sol, o campo magnético da Terra, presença de vizinhos ou reações químicas. Em peixes, a polarização pode ser crucial para a sua sobrevivência, pois ajuda na navegação, migração e localização de presas. Por exemplo, muitas espécies de peixes migratórios utilizam a polarização entre membros para navegar em águas abertas. Em cardumes, onde o comportamento coletivo entre os peixes é observado, se por alguma razão um peixe muda sua direção de deslocamento, os outros peixes do cardume tendem a ajustar sua posição e direção em relação a este indivíduo, criando um grupo polarizado, alinhados na mesma direção de deslocamento [78]. A polarização entre os peixes podem indicar para seus companheiros de grupo, informações importantes, isso permite que eles se movam com maior rapidez, precisão, absorvendo e transmitindo informações com seus vizinhos.

O primeiro modelo voltado ao estudo da dinâmica comportamental de matéria ativa, introduzido por Tamas Vicsek [86], leva em consideração o deslocamento de partículas em condições periódicas, impulsionadas com uma velocidade constante, onde uma dada partícula presente no sistema assume a direção média do movimento das partículas em sua vizinhança.

Em nossas análises, a orientação dos indivíduos contribui para descrever a estrutura macroscópica do grupo, considerada como uma medida do grau em que esses indivíduos pertencentes ao grupo estão se movendo na mesma direção. A polarização é definida como o módulo da velocidade média normalizada de cada peixe, representado pela equação 2.1. De forma mais simplificada, é a direção média em que as *SPPs* estão se movendo. Propriedade importante devido à regra de alinhamento, que se baseia na direção média dos movimentos das *SPPs*.

$$P = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \frac{\vec{v}_i}{|\vec{v}_i|} \right|, \quad (2.1)$$

onde  $N$  é o número de indivíduos e  $\vec{v}_i$ , é o vetor velocidade do  $i$ -ésimo indivíduo. Podemos observar uma representação da polarização na figura 2.1, onde os vetores  $\vec{v}_i$  são representados pelas setas pretas e cada peixe é identificado por um círculo de cor sólida colorida.

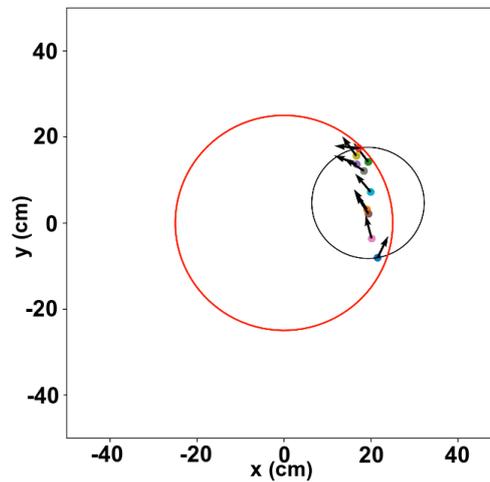


Figura 2.1: Representação gráfica da polarização de acordo com a equação 2.1, para um experimento com  $N = 10$  peixes. A representação segue os valores reais atribuídos ao aquário com  $r = 25\text{cm}$  e centralizados nas coordenadas  $(0,0)$ .

A medida da polarização descreve o grau de alinhamento de um grupo de partículas em relação a uma direção comum. Sendo igual a 1, se todas as partículas estiverem orientadas na mesma direção, ou seja, se o vetor velocidade de todas as partículas estiverem apontando em uma mesma direção de deslocando. Isso significa que estão altamente polarizados em relação a uma direção comum. Por outro lado, à medida que as partículas vão se movendo em direções aleatórias entre si, a medida de polarização tende a diminuir, ou seja, as partículas ficam menos alinhadas em relação a uma direção comum. Quando as partículas estiverem se deslocando aleatoriamente, a medida de polarização será mínima. Em algumas situações, as partículas podem se alinhar paralelamente umas às outras, mas em direções opostas, ou seja, de forma colinear. A figura 2.2 ilustra uma situação em que alguns espécimes de *Danio rerio* estão em direções opostas, fazendo com que os vetores de velocidade  $\vec{v}_i$  se cancelem. Esse fenômeno ocorre quando a velocidade das partículas é considerada idêntica.

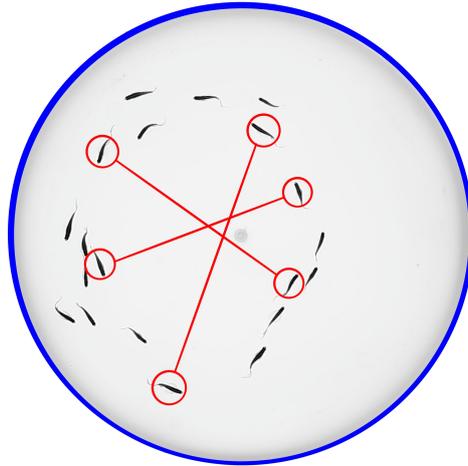


Figura 2.2: Imagem de uma realização experimental com  $N = 20$ . A imagem destaca uma das possibilidades onde os peixes apresentam direções opostas, resultando no cancelamento dos vetores  $\vec{v}_i$ .

O cientista Craig W. Reynolds (1953 - ) em 1987 [64] propôs três regras básicas que governam o movimento coletivo de animais, conhecido como comportamento de grupo ou “*swarming*”. As regras são:

1. Alinhamento: cada indivíduo deve tentar se alinhar com a direção média de movimento dos seus vizinhos, a fim de manter a coesão do grupo.
2. Coesão: cada indivíduo deve tentar se mover em direção ao centro de massa do grupo, a fim de manter a coesão e a proximidade do grupo.
3. Separação: cada indivíduo deve manter uma distância segura em relação aos seus vizinhos, a fim de evitar colisões e garantir a segurança.

Essas três regras são consideradas suficientes para produzir um comportamento coletivo complexo e dinâmico, que pode ser visto em grupos de animais na natureza [64, 86, 17]. A partir dessas regras, foram desenvolvidos diversos modelos de simulação de comportamento coletivo de animais, que têm sido úteis para estudar diversos fenômenos biológicos e para desenvolver novas tecnologias inspiradas na natureza.

### 2.3.2 Agregações de Partículas

O segundo parâmetro de ordem analisado, refere-se à atração entre indivíduos, formando agrupamentos próximos uns dos outros, tratando-se de uma interação fundamental de grupo, observado em muitas espécies de animais, desde insetos até mamíferos [91]. Ao se estabelecer uma agregação, é comum observar que os indivíduos que a compõem coordenem suas ações e se comportem de maneira cooperativa. Com isso, o grupo passa a se comportar como um único organismo a ser analisado, diferente da polarização onde todos os indivíduos são analisados de

forma individual. O organismo formado é representado pelo menor círculo que abrange todas as partículas. Esse círculo pode variar seu raio de acordo com a distribuição espacial adotada pelas partículas estudadas.

O raio de agregação é usado para avaliar a tendência dessas partículas em se agruparem ou não e pode ser descrito como sendo compacto ou disperso, dependendo da forma como as partículas se agrupam [78]. Um raio de agregação disperso ocorre quando as partículas estão mais distantes umas das outras, formando um grupo menos denso e mais espalhado, como observado nos peixes da figura 2.3a. Já o raio de agregação compacto ocorre quando as partículas estão muito próximas umas das outras, formando um grupo denso e coeso, como observado na distribuição espacial adotadas pelos peixes na figura 2.3b.

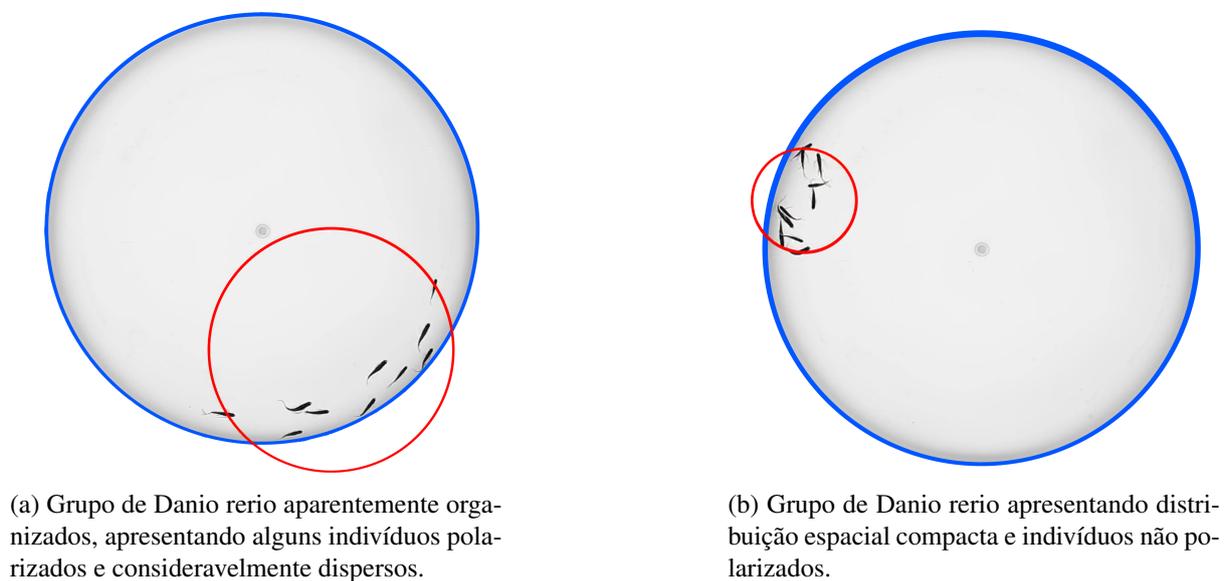


Figura 2.3: O círculo azul representa o limite das bordas do recipiente de raio  $R = 25\text{cm}$ , e o círculo vermelho envolvendo os peixes representa o círculo de agregação de raio  $R_a$ , onde  $R_a \in [0, R]$ .

Ao observar a figura 2.3, pode-se perceber que o raio de agregação possui tamanho variável, ou seja, o círculo que envolve todos os peixes pode aumentar ou diminuir seu diâmetro ao longo do tempo, mesmo em grupos com a mesma quantidade de indivíduos. Alguns fatores podem influenciar a tomada de decisão dos indivíduos do grupo e resultar em propriedades de estruturas mais ou menos compactas, além de indivíduos polarizados ou não. Por exemplo, estímulos locais de medo ou estresse ao serem manuseados e/ou inseridos em um ambiente novo (desconhecido), ou também a falta de espaço em ambientes reduzidos que pode influenciar as interações entre os peixes, uma vez que os animais tendem a dispor de maior visibilidade em regiões confinadas e assim, possuir maior probabilidade no aumento de estresse devido a superlotação e sobrecarga de informação visual [50], porém em regiões livres, os animais podem se distanciar, causando perda de informação entre os membros do grupo.

Outro fator que pode influenciar a distribuição espacial dos indivíduos é a dependência ou

não da densidade. Quando a presença de um vizinho interfere significativamente no deslocamento do indivíduo, por exemplo, devido a interações sociais, o comportamento dos animais está diretamente ligado à densidade do meio. Por outro lado, quando a presença de vizinhos não afeta o comportamento de um indivíduo em seu habitat, é dito que o movimento dos animais é não-dependente da densidade [10, 35]. Em nosso experimento, é notório que a presença de vizinhos afeta o comportamento do outro indivíduo. Logo, trata-se de uma análise experimental que depende da densidade do sistema para modificar o comportamento dos animais observados.

### 2.3.3 D-Centroide

O D-centroide é definido como a distância do centro de massa do grupo em relação à parede de aquários ou tanques, assim como os parâmetros já mencionados neste trabalho, também trata-se de um fator que pode influenciar o comportamento coletivo de animais. Definido na equação 2.2, primeiramente é calculado o centro de massa do grupo  $\vec{R}_{CM}$ , como o somatório das posições  $x$  e  $y$  dos  $N$ -indivíduos, dividido pela quantidade  $N$  de peixes que constituem o grupo, assumindo que todos possuem massa igual a 1, e então, assim como em [43], o D-centroide com  $D(t)/R \in [0, 1]$ , pode ser calculado como:

$$\frac{D(t)}{R} = 1 - \frac{|\vec{R}_{CM}|}{R} \quad (2.2)$$

onde  $R$  é o raio do recipiente e,  $\vec{R}_{CM}$  é a componente de posição do centro de massa do cardume.

Na figura 2.4 é possível observar como o D-centroide é definido de forma mais ilustrativa. Em habitat natural esse fenômeno pode ser observado nas margens de lagos, rios ou recifes de coral. Pesquisas constataram que o comportamento de grupos com tamanhos variados de peixes ao longo da borda do tanque é também influenciada pela densidade, afetando a atividade de natação e o comportamento coletivo dos indivíduos ao longo da borda de um tanque [80]. Assim como a proximidade dos indivíduos à parede também pode influenciar a organização espacial dos indivíduos do grupo, bem como a frequência de mudanças de direção do agregado [43]. Da mesma forma [81] constataram que a atividade comportamental de grupos de *Pseudorasbora parva* também foi afetada, causando mudanças de deslocamento dos indivíduos ao longo da parede do tanque e que esse fenômeno também influenciava na escolarização e que a persistência ao longo das bordas eram mais fortes em tanques circulares. Considerando que bordas circulares são melhores de se deslocar, se comparado com tanques quadrados, onde os peixes se mantinham próximos aos cantos.

Além do deslocamento do grupo, outros parâmetros como polarização, agregação e as transições de *school* e *shoal* também podem ser influenciados pela proximidade à bordas. Através de pesquisas como [5], foi investigado a transferência de informações e a inércia comportamental em bandos de aves da espécie *estorninhos* e descobriram que a distância da parede, o número de indivíduos e sua polarização influenciavam a eficiência da transmissão de informações entre os indivíduos do bando. Além disso, [67] mostraram que a influência da proximidade da parede nos padrões de contágio comportamental em grupos de animais móveis, como peixes,

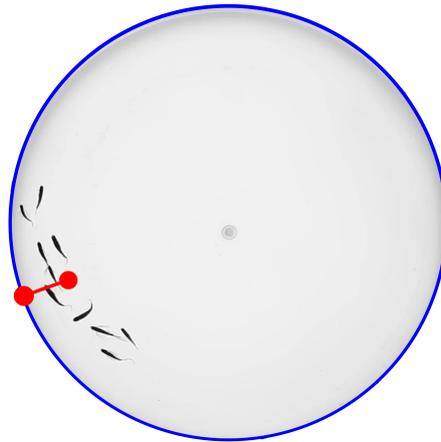


Figura 2.4: Imagem vertical de uma representação do D-centroide com  $N = 10$ . O círculo azul representa os limites das bordas do aquário. A semi reta vermelha liga o centro de massa do grupo ao ponto mais próximo da borda, ambos representados por círculos vermelho.

pode ser prevista através da análise das redes de interação ocultas. Resultando na tendência de transições comportamentais entre grupos de peixes influenciadas pela distribuição espacial dos indivíduos em relação à parede.

Alguns estudos sugerem que as características apresentadas nos estudos da influência do comportamento animal aos se aproximar de bordas ou “efeito *edge-following*” pode ser explicado pela busca de segurança, necessidade de explorar novos ambientes, assim como pela densidade do cardume, tamanho do grupo e forma do tanque onde estão [66]. Como os experimentos são realizados com forte iluminação, pouco volume de água e sem regiões que possam servir como abrigo, temos então um ambiente considerado perigoso e desconhecido, fazendo com que os indivíduos permaneçam o mais próximo possível das bordas. Esses estudos mostram que a distância de grupos de animais em relação às paredes ou obstáculos é um agente importante a ser considerado em análises comportamentais coletivas de animais. Entender como esses fatores afetam o comportamento coletivo dos animais pode ter implicações importantes em áreas, como design de robôs inspirados na natureza, além de poder ajudar a entender como grupos de animais se adaptam a ambientes naturais com obstáculos, como florestas e recifes de coral.

## 2.4 School vs Shoal

Ao observar o nado de peixes em grupo, é comum ouvir termos como “*school*” e “*shoal*” sendo utilizados indistintamente para definir um grupo de peixes nadando juntos. No entanto, nas ciências naturais, esses termos se referem a comportamentos coletivos diferentes, que podem ser caracterizados por diferentes parâmetros, como a polarização que mede o grau de alinhamento dos indivíduos em um grupo [86]; a agregação, que mede a proximidade dos indivíduos no grupo [30] e a posição de deslocamento do centro de massa do grupo em relação

às paredes do ambiente onde estão inseridos [5], todos esses termos foram abordados anteriormente e fazem parte de uma variedade de parâmetros que são utilizados para identificar transições de fase em sistemas de comportamento coletivo de matéria ativa e para atribuir as devidas definições aos fenômenos vistos em grupos de animais.

Em 1983, algumas definições foram atribuídas a características comportamentais adotadas por cardumes [59], buscando esclarecer a confusão relacionada aos termos de *shoal* e *school*, sendo este último considerado, como um subgrupo mais estável, existente dentro de definições e características comportamentais de *shoal*. Em estudos científicos, um grupo de peixes que permanece unido por razões sociais é definido como *shoal*. Os indivíduos do grupo adotam um comportamento de agregação e podem se movimentar juntos, mas não necessariamente de forma sincronizada [59, 35]. Isso quer dizer que os indivíduos não estão se movendo na mesma direção, com mesma velocidade ou frequência de movimentos.

Por outro lado, a definição de *school* é baseada em uma configuração dinâmica, que inclui propriedades espaciais e dinâmicas específicas, tais como a velocidade, agregação, polarização e a flutuação [90]. Essas propriedades são responsáveis pela formação de uma estrutura dinâmica que define a organização dos indivíduos no grupo. É importante ressaltar que a análise quantitativa e a compreensão dessas propriedades espaciais e dinâmicas podem fornecer informações para o estudo do comportamento coletivo e entender como peixes se organizam em grupos.

Porém, em meio a tantas propriedades, é comum haver conflito ao classificar um grupo de peixes como sendo um possível *shoal* ou uma possível *school*. No entanto, muitos pesquisadores reconhecem que esses comportamentos existem como extremidades opostas de um espectro contínuo de comportamentos sociais em peixes, ou seja, existe uma ampla gama de possíveis estados intermediários em comportamentos coletivo. Além disso, esses comportamentos podem variar de acordo com fatores complexos e interconectados como condições ambientais, a composição do grupo, espécie, hierarquia social e o objetivo do movimento [21]. As mudanças entre os possíveis estados, que ocorrem dentro de um grupo, são uma característica das transições de fase.

Partindo de uma abordagem biológica, o comportamento coletivo é definido com base em sua estrutura e organização. *Shoal*, são vistos como grupos pouco estruturado, enquanto *school* são consideradas grupos altamente estruturados [31]. No entanto, como já foi abordado, essas distinções não são tão claras e, na verdade, há uma continuidade entre esses dois comportamentos coletivos, com diferentes níveis de estrutura e organização, como pode ser observado também no diagrama desenvolvido em [59]. Nessa perspectiva, é importante considerar que existem casos intermediários que não se encaixam claramente em uma das duas categorias abordadas. Além disso, as propriedades espaciais e dinâmicas dos grupos de peixes podem mudar ao longo do tempo, podendo variar rapidamente entre uma definição e outra.

Do ponto de vista da física, o comportamento coletivo em grupos de animais são frequentemente comparados a fenômenos como, polarização em partículas ferromagnéticas e a disposição espacial de átomos e moléculas [21]. Para entender esses comportamentos coletivos, simulações computacionais são amplamente utilizadas, como as desenvolvidas por [86, 34]. Para as simulações em [34], foi proposto um diagrama de fase bidimensional que descreve a relação entre os graus de coesão e polarização em grupos animais. Esse diagrama de fase per-

mite uma representação visual da dinâmica coletiva e ajuda a identificar diferentes estados de comportamento coletivo, desde a desorganização até a organização completa. Através do diagrama é possível realizar associações entre o comportamento coletivo dos animais com sistemas de transições de fase mais familiares da física, como as mudanças de fase sólidas, líquidas e gasosas. Assim como o comportamento coletivo dos animais, a matéria também apresenta estados específicos em cada uma das suas fases. Por exemplo, nos materiais em estado sólido, os átomos que a compõem possuem posições definidas e regulares, enquanto que nos materiais líquidos e gasosos, as posições são aleatórias e menos ordenadas.

Embora os sistemas de matéria ativa não sejam exemplos de equilíbrio termodinâmico, ainda podem ser utilizadas analogias com sistemas em equilíbrio e fazer uso da física estatística e simulações computacionais para descrever o comportamento coletivo de grupos de organismos. O uso desses modelos pré-existentes na biologia e na física tem levado a avanços significativos na compreensão da estrutura do comportamento coletivo em animais, como a teoria da matéria condensada [36] e dos líquidos [37]. Também é importante lembrar que a definição exata de *school* e *shoal* podem variar dependendo do contexto e da espécie de peixe em questão. No entanto, a distinção entre alta polarização/baixa agregação e baixa polarização/alta agregação já é um padrão observado em muitos estudos sobre comportamento coletivo.

## 2.5 Modelos de Matéria Ativa

Como já foi mencionado nas seções anteriores, os modelos de matéria ativa são usados para descrever o comportamento coletivo de *SPPs*. Esses modelos foram propostos para estudar a auto-organização em sistemas complexos, como enxames de animais, bactérias ou robôs. Como exemplo mais conhecido entre eles, podemos destacar o modelo de matéria ativa de Vicsek [86] para condições de contorno periódicas. Porém, existem outros modelos que possuem princípios semelhantes, como o modelo (S&M) de Sannomiya e Matuda [48], que foi utilizado como referência para modelar o comportamento do *Danio rerio* e compará-lo com os dados experimentais adquiridos neste trabalho. Além do modelo de Vicsek e do S&M, podemos mencionar o modelo de Reynolds [64], que se refere a uma simulação do comportamento coletivo de animais, em que cada indivíduo é modelado como um agente autônomo ou “*Boids*” que são regidos por três regras básicas no comportamento coletivo.

### 2.5.1 Modelo de Reynolds

O modelo de “*Boids*” de Reynolds [64] é uma abordagem computacional para simular o comportamento coletivo. “*Boids*” é um agente autônomo que representa um indivíduo em um comportamento coletivo, como um pássaro em um bando ou um peixe em um cardume. Cada “*Boid*” segue três regras básicas de comportamento coletivo, essas regras foram descritas na seção 2.3.1, baseadas em alinhamento, coesão e separação.

De acordo com [64], a regra de coesão faz com que os animais sejam atraídos uns aos outros, o que significa que cada animal tenta se manter perto de seus vizinhos. A regra de separação, evita colisões entre os animais, fazendo com que cada um deles evite ficar muito próximo dos outros, e a regra de alinhamento, por sua vez, faz com que os animais se movam

na mesma direção, o que leva à formação de padrões coletivos. Por meio dessas regras os animais tendem a permanecer próximos o suficiente evitando colisões e mantendo a troca de informações entre seus vizinhos, minimizando uma possível fragmentação de informações e do grupo [4].

As regras de alinhamento, coesão e separação são aplicadas a cada “*Boid*” na abordagem computacional de Reynolds, que são modelados como agentes individuais que interagem entre si. Cada animal tem sua própria velocidade e direção, que são atualizadas a cada iteração da simulação. O modelo de “*Boid*” de Reynolds é amplamente utilizado na simulação de comportamentos coletivos para criar efeitos de multidões de animais, como cardumes, bandos de pássaros e rebanhos de animais de pasto. Além disso, o modelo também tem sido usado para estudar o comportamento de bactérias em biofilmes, a formação de ciclones em atmosferas planetárias e o comportamento de robôs em enxames [18, 49, 71].

### 2.5.2 Modelo de Vicsek

O modelo de Vicsek proposto em 1995 foi realizado com um análise sistemática mais aprofundada sobre o comportamento de *SPPs*, onde os envolvidos no trabalho sugeriram a adição de ruído e investigaram transição de fase para o movimento coletivo com objetivo de entender de maneira mais detalhada as condições necessárias para o surgimento do movimento coletivo. Em seu modelo, Vicsek utilizou apenas partículas pontuais sujeitas a interações simples e locais em uma região quadrada de dimensões  $L$  com condições de contorno periódicas.

O modelo de Vicsek sugere que a cada instante, uma partícula se move na direção média do movimento de seus vizinhos, porém com um grau de imprecisão que é considerado como ruído. No estudo em questão, foi analisado o efeito das flutuações aleatórias que ocorrem em um sistema ou fenômeno devido a sua própria natureza intrínseca. Essas flutuações, conhecidas como ruído intrínseco, são inerentes ao sistema e não resultam de influências externas. Ao ser analisado descobriu-se que, conforme sua magnitude aumenta ocorre uma transição de fase no sistema. Nesse processo, o estado ordenado no qual todas as partículas se movem na mesma direção dá lugar a um estado desordenado em que as partículas se movem em direções aleatórias. Esses resultados foram cruciais para destacar a importância do ruído na dinâmica da matéria ativa e como ele pode desempenhar um papel fundamental no surgimento de padrões complexos.

As análises foram realizadas seguindo condições iniciais definidas pela posição e pela direção de movimento das partículas que compõem o sistema. Inicialmente em  $t = 0$ , as partículas são posicionadas aleatoriamente em uma área determinada e direção de movimento inicial também aleatória. Essas partículas são capazes de se mover independentemente a uma velocidade constante. A interação entre as partículas é definida por um raio de interação  $r = 1$ , onde as partículas interagem apenas com outras partículas dentro desse raio. A posição da  $i$ -ésima partícula atualizada em  $t + 1$  é definida como:

$$\vec{x}_i(t + 1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t + 1)\Delta t, \quad (2.3)$$

onde  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre duas medições.

A velocidade de uma partícula  $\vec{v}_i(t+1)$  foi construída para ter um mesmo valor  $v$  e uma direção dada pelo ângulo  $\theta(t+1)$ . Este ângulo é obtido por:

$$\theta(t+1) = \langle \theta(t) \rangle_r + \Delta\theta, \quad (2.4)$$

onde  $\langle \theta(t) \rangle_r$ , representa a direção média das velocidades das partículas dentro de um círculo de raio  $r = 1$  em torno da partícula dada.

Na figura 2.5, é apresentadas frames de diferentes instantes do sistema estudado [86]. Em (a) no instante  $t = 0$ , as posições e a direção das velocidades são distribuídas aleatoriamente. Em (b), o sistema com baixo ruído e densidade, as partículas tendem a se acumularem em blocos e se moverem coerentemente. Em (c) o sistema apresenta ruído e densidade mais altos e as partículas se movem aleatoriamente com alguma correlação. Por fim, em (d) o sistema é composto por alta densidade e baixo ruído, e as partículas tendem a se mover espontaneamente na mesma direção.

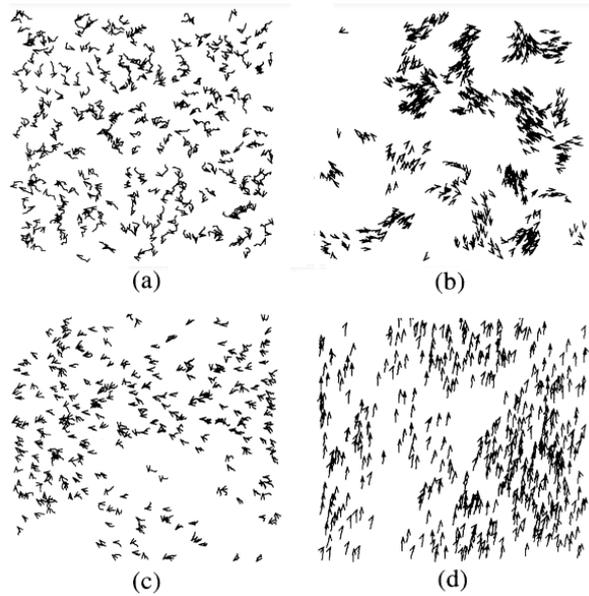


Figura 2.5: Evolução comportamental de animóides ( $N = 300$  em todas as situações) sob a dinâmica do modelo de Vicsek, apresentando em uma sequência de 20 passos de cada animóide para uma variação de parâmetros.

Para analisar as transições de fase entre comportamentos desordenados e ordenados, foi utilizado o parâmetro de ordem definido como a média da direção dos vetores unitários da velocidade de cada indivíduo, equação 2.5 ou polarização.

$$v_a = \frac{1}{Nv_0} \left| \sum_{i=1}^N \vec{v}_i \right|, \quad (2.5)$$

onde  $N$  é o número de partículas no sistema e  $v_0$  o módulo da velocidade de cada partícula.

Se o movimento é desordenado, as velocidades das partículas individuais apontam em direções aleatórias e a média é um vetor de pequena magnitude (próximo a zero). Enquanto que, para movimento com direção ordenada de velocidade, as partículas se movem espontaneamente na mesma direção, obtendo  $v_0 \approx 1$ .

### 2.5.3 Modelo S&M

O modelo desenvolvido em 1985 por Sannomiya e Matuda [48] aborda a modelagem do comportamento do peixe *Rhodeus ocellatus ocellatus* em um tanque retangular com 150cm comprimento e 100cm de largura, com uma lâmina d'água de 7cm de espessura. O experimento é realizado com a liberação dos peixes em posições específicas do tanque e cada peixe é considerado como uma partícula descrita individualmente por uma expressão matemática ou equação de estado, que descreve a relação entre as propriedades de um sistema. No artigo [48], o modelo faz uso da equação 2.6 para descrever o comportamento individual de cada peixe, bem como as interações entre eles. A equação leva em consideração sete componentes que estão relacionadas entre forças que agem no sistema.

$$m\ddot{x}_i = \vec{F}_i(t, x_i, \dot{x}_i, x_j, \dot{x}_j)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N; i \neq j \quad (2.6)$$

onde  $\vec{F}_i$  é o vetor relacionado aos parâmetros emergentes em um sistema com N indivíduos,  $m$  é a massa, e  $x_i$ ,  $\dot{x}_i$ ,  $x_j$  e  $\dot{x}_j$  são as variáveis de posição e velocidade dos indivíduos.

O objetivo principal do estudo era estimar os parâmetros desconhecidos no modelo de comportamento de peixes que estavam interligados às forças analisadas no sistema. As estimativas dos parâmetros foram realizadas através de um método estatístico usado para encontrar a melhor aproximação linear para um conjunto de pontos que apresentam uma certa dispersão, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores previstos pela aproximação linear, o método conhecido como mínimos quadrados.

No modelo é considerado que o comportamento dos peixes em um cardume é homogêneo, dessa forma, os parâmetros incluídos na equação são idênticos independentemente do indivíduo. Por meio das estimativas dos parâmetros, foi descrito um conjunto de regras que regem o comportamento individual de cada peixe. Essas regras aplicadas em larga escala permitem reproduzir o comportamento coletivo de todo o cardume de maneira realista, como observado em cardumes de peixes na natureza. Além disso, o modelo também pode ser usado para simular diferentes tipos de interações, como a resposta do cardume a estímulos externos.

# Análise Experimental

Existem diversas formas de vida que apresentam propriedades de autopropulsão, sendo essencial para muitos organismos viverem e se movimentarem de maneira autônoma. Além disso, muitas dessas formas de vida também possuem características de viver em grupo, o que lhes permite criar estruturas e movimentos coletivos em grande escala, ou ainda, organismos como cílios e flagelos presentes em células animais e vegetais que geram movimentos para locomoção e alimentação, e até mesmo as células musculares do nosso corpo, que se contraem para gerar movimento. Caso contrário, os organismos se limitariam a utilizar processos muito mais lentos e passivos como a difusão, para mover DNA e proteínas dentro de células ou tecidos, e muitas das estruturas e funções complexas da vida talvez nunca tivessem evoluído [61]. Cientistas das áreas de Biologia e Física têm se dedicado ao longo de décadas ao estudo dos princípios gerais da matéria ativa. Inicialmente, o foco era principalmente na identificação e diversidade de organismos que exibem tais características. No entanto, nos últimos anos, tem havido um crescente reconhecimento da importância de investigar os princípios pelos quais esses organismos se auto-organizam em estruturas complexas. Como resultado, o que hoje é conhecido como pesquisa de matéria ativa não começou realmente até meados da década de 1990 [55].

Os padrões formados pela distribuição espacial de sistemas vivos que apresentam características de grupo são de fato visualmente impressionante aos olhos humanos [55]. Porém, análises baseadas apenas em observações a olho nu não são suficientes para responder algumas questões sobre como e por que os organismos apresentam tais comportamentos, ou ainda quando esses padrões semelhantes surgem de mecanismos puramente físicos e quais vantagens ou desvantagens são atribuídas a estes tipos de padrões. Alguns modelos matemáticos como o modelo (S&M) [48] que estudam comportamentos sociais, como cardumes de peixes, fornecem um caminho promissor para abordar algumas dessas questões e que servirá como base para nossa atual pesquisa desenvolvida no laboratório de sistemas complexos e universalidades (LaSCoU), na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) utilizando peixes ornamentais como *SPPs* para tentarmos descrever seu comportamento em ambientes finitos e sob condições controladas.

### 3.1 *Danio rerio* (Zebrafish)

O peixe ornamental usado em nosso experimento foi o *Danio rerio*, figura 3.1, peixe-zebra ou ainda como é conhecido aqui no Brasil, paulistinha. É um peixe de água doce nativo do sul da Ásia, originário das partes baixas dos principais rios da Índia, Bangladesh e Nepal, onde as principais características dessas regiões é o clima de monções, com estações secas e chuvosas bem definidas [20]. Esse clima característico exerce grandes efeitos sobre as condições ambientais locais, assim como no habitat onde se encontra o *Danio rerio*, podendo causar alterações

dos compostos presente na água ou ainda na variação de alimentos, uma vez que o *Danio rerio* é uma espécie que comumente habita regiões rasas e de pouca movimentação de rios e lagos. Por estar em regiões que apresentam tais características, a temperatura e o pH (potencial hidrogeniônico) da água são alguns dos fatores que sofrem maiores alterações, variando de 12°C a 39°C e 5.9 a 9.2, respectivamente [84]. Estas variações proporcionam ao *Danio rerio* maior resistência às condições impostas em laboratório, se tornando uma espécie de fácil reprodução e grande taxa de sobrevivência em meios artificiais.



Figura 3.1: *Danio rerio* adulto com aproximadamente 1 ano e 7 meses de vida. Os indivíduos utilizados pertencem ao Laboratório de Ecofisiologia e Comportamento Animal (LECA).

Diante das características abordadas, de acordo com [88], os parâmetros ambientais ideais para a manutenção do *Danio rerio* são: Temperatura entre 27°C e 29°C, pH 6.5 a 7.5, condutividade de 100 a 200  $\mu$ S, amônia, nitrito e nitrato devem conter 0 ppm (partes por milhão). Entretanto, sabemos que os valores destes parâmetros são alterados sempre que ocorrem as manutenções dos ambientes, já que as condições adequadas atingem o nível esperado gradualmente. Essas mudanças graduais são vistas particularmente no controle do pH e eliminação do cloro, onde é corrigido por adição de Hidróxido de sódio e Tiosulfato de sódio, respectivamente. Regulando-os para um valor próximo ao indicado, obtemos parâmetros que influenciam na proliferação de bactérias responsáveis pela filtragem biológica do ambiente aquático, garantindo melhor qualidade de vida para os peixes.

Além das condições ideais da água, a luz também se torna um fator importante para a criação do *Danio rerio*. Por ser uma espécie de peixe que vive em águas rasas com vegetação aquática abundante, passam a frequentar tanto regiões próximas da vegetação, com regiões escuras ou predominância de sombra, quanto regiões abertas expostas aos raios solares. Em relação ao período exposto a ambientes claros e escuros em cativeiro, algumas literaturas sugerem tanques composto por material escuro, porém bem iluminado, para o desenvolvimento ideal dos peixes, combinando com um ciclo de luz com 14h claro e 10h escuro [24]. Esse ciclo é conhecido como fotoperíodo, correspondente ao período de tempo em um dia que um organismo é exposto à luz e à escuridão.

A partir das condições vistas, além do baixo valor atribuído para aquisição, o *Danio rerio*

tornou-se uma espécie de peixe popular em aquarismo e vem ganhando reconhecimento em áreas de pesquisa científica devido à sua alta resistência ambiental, baixo custo de aquisição, semelhança genômica com humanos e fase inicial de vida com corpo translúcido para estudo de medicamentos e doenças humanas [15]. Além de se tratar de um peixe de pequeno porte, atingindo cerca de 3 a 5cm em sua fase adulta e possuir características sócias de bando entre indivíduos de mesma espécie. Tornando o *Danio rerio* um modelo animal de pesquisa amplamente utilizados em praticamente todos os subcampos da biologia, como na pesquisa do câncer e áreas da neurociência comportamental [38].

Para o desenvolvimento desta pesquisa, o *Danio rerio* será mantido em ambiente controlado e utilizado para a observação de mudanças de comportamento de acordo com a variação do número de indivíduos em um tanque com volume de água constante, sem interferência externas, distribuição uniforme de iluminação e temperatura aproximadamente idêntica para todos os testes. Todos os procedimentos envolvendo os animais foram submetidos a avaliações pelo Comitê de Ética no Uso de Animais - CEUA/UFRPE, protocolada sob o CEUA Nº 1676051021. Nas seções a seguir será discutido o método de reprodução do *Danio rerio* utilizado em laboratório e o aparato experimental usado em nosso trabalho.

### 3.1.1 Reprodução em Laboratório

Assim como o método de reprodução do *Danio rerio* realizadas em laboratório, também será abordado eventuais mudanças do aspecto físico e biológico dos indivíduos que podem ocorrer em consequência de fatores relacionados ao habitat e aos indivíduos utilizados.

O *Danio rerio* utilizados em nossos experimentos fazem parte de um determinado grupo de peixes reproduzidos no Laboratório de Ecofisiologia e Comportamento Animal (LECA), onde são mantidos sob condições consideradas adequadas de acordo com as literaturas encontradas e pesquisadores da área de biologia. Possuem cerca de 1 ano e 7 meses de vida e comprimento entre 3 e 5cm, selecionados individualmente para manter as características originais dos peixes (prateados com listras pretas e nadadeiras curtas) e evitar alterações de aspectos físicos. Para manter o bem estar e qualidade do cardume, durante toda sua fase de vida, do ovo à vida adulta, os peixes seguem determinadas etapas de controle e observação.

Os primeiros peixes foram adquiridos em lojas de aquarismo após passarem por seleção para escolher indivíduos saudáveis e sem alterações genéticas e possuem as características dos peixes selvagens encontrados na natureza, como os indivíduos da figura 3.1. Após a seleção, são levados para o LECA e mantidos em quarentena por 60 dias para eliminar possíveis problemas de saúde. Em laboratório, são mantidos em ambiente controlado com temperatura de aproximadamente  $26^{\circ}\text{C} \pm 0.5$ , fotoperíodo com 14h de ambiente iluminado e 10h de ambiente escuro, sendo mantidos machos e fêmeas no mesmo aquário, respeitando a medida de 2 peixes por litro, aeração (11 mg/L de oxigênio dissolvido), pH de aproximadamente  $7.0 \pm 1.0$  e filtragem constante por meio de tratamento físico (perlon), químico (carvão ativado) e biológico (cerâmica colonizada por bactérias).

Assim como o ambiente, a alimentação também é controlada, seguindo uma dieta variada entre alimentos seco e organismos vivos, sendo fornecidas duas vezes ao dia, onde, durante o período da manhã são alimentados com ração 45% de proteína bruta e a tarde, são alimentados com Náuplios recém-nascidos de artêmia (*Artêmia salinas*) congelados. Essa última, antes de

serem servidas aos peixes são descongeladas e lavadas, evitando que o sal contido na Artêmia altere a composição da água. Tais condições e alimentação balanceada garantem desenvolvimento ideal, contribuindo diretamente no processo de reprodução do *Danio rerio*.

Outra questão que foi levada em consideração para a reprodução, foi o aquário de procriação, figura 3.2, usado para retenção dos peixes, divisão por sexo e a proteção dos ovos recém depositados pela fêmea. O aquário é constituído de acrílico por três compartimentos internos; dois superiores, onde pode ser observado nas figuras 3.2 e 3.2b um anteparo perfurado posicionado no meio do aquário, proporcionando a troca de feromônio entre os indivíduos e um terceiro compartimento, localizado na região inferior, formado por um acrílico com pequenos furos por onde os ovos passam e ficam protegidos evitando que sejam consumidos pelos peixes adultos.



(a) Aquário de reprodução.



(b) Configuração de indivíduos para reprodução.

Figura 3.2: Estrutura utilizada para reprodução do *Danio rerio* no biotério

Os filhotes recebem os mesmos cuidados que os adultos a respeito da água, são alimentados com artêmia recém eclodidas nos primeiros trinta dias de vida, após este período, para os próximos 60 dias, os animais passam por modificação na dieta, se alimentando de artêmia recém eclodida e ração triturada, duas vezes ao dia. Na fase adulta, com aproximadamente 4 meses de idade, os animais são criados conforme as condições descritas no início da subseção e assim repetindo todo o procedimento de criação, reprodução e utilização dos indivíduos para finalidades científicas.

### 3.2 Aparato Experimental

Para chegar à configuração definitiva utilizada, nosso experimento sofreu algumas mudanças ao longo de todo o processo de experimentação, buscando combinações de equipamentos

que proporcionassem melhor qualidade e resolução para a aquisição dos vídeos desejados. Inicialmente, o equipamento experimental, figura 3.3, contava com uma webcam Logitech C920 HD Pro (1920x1080), pedestal flexível 360° com Braço de 75cm ajustável para montagem de mesa, iluminação com fita de LED e um aquário circular de vidro com dimensões de 10.0cm de raio contendo uma lâmina d'água de 2.0cm de espessura. Porém as webcams em geral são limitadas quando se trata de capturar imagens com alta qualidade, já que não contam com hardware específico para tratamento de imagens. As funções dos sensores das webcams são limitados pelo fato de seu pequeno tamanho. Como resultado, não são capazes de capturar tanta luz e, portanto, apresentam dificuldades em áreas com pouca iluminação e regiões de contrastes entre áreas de contorno com diferentes tons, como produto final, nos fornece uma imagem digital de baixa qualidade.

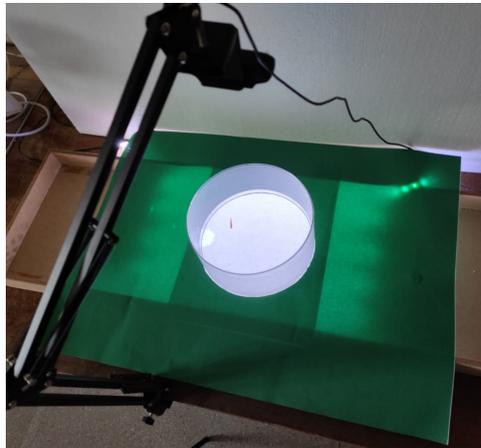


Figura 3.3: Primeira estrutura experimental montada no Laboratório de Sistemas Complexos e Universalidades (*LaSCoU*) para a realização dos registros das trajetórias dos peixes.

Porém as webcams, apesar de possuírem a vantagem de serem compactas e de fácil manuseio, apresentam uma limitação em relação à qualidade final dos vídeos capturados devido à sua baixa taxa de bits. A taxa de bits refere-se às unidades de dados que compõem os conteúdos digitais da imagem, e sua capacidade de transferência ou processamento em determinados períodos de tempo determina a quantidade de poder de processamento necessário para gravar e reproduzir vídeos [70]. É importante ressaltar que a taxa de bits pode afetar significativamente a qualidade final dos vídeos capturados, uma vez que a qualidade é medida pela taxa de bits, assim como uma imagem é medida pela resolução. Essa taxa é a razão pela qual duas câmeras com a mesma resolução capturam imagens ou vídeos completamente diferentes, em relação a nitidez, clareza e definição de cores.

Ainda abordando questões relacionadas ao aparato experimental, figura 3.3, dessa vez a respeito do aquário de vidro utilizado, obtivemos problemas envolvendo o reflexo dos peixes ao se aproximarem da borda, gerando troca de identidade entre o peixe real e sua imagem refletida, uma vez que o programa usado para reconhecimento e rastreamento das trajetórias dos peixes consideravam o reflexo como sendo também um peixe real. Somando ao problema do reconhecimento, ainda foi observado que os peixes poderiam interagir com seu próprio reflexo

espelhado na parede do recipiente, causando um “comportamento agressivo” [69]. Os peixes se comportavam na maior parte do tempo como se estivessem “brigando” com o seu reflexo, resultando em um comportamento diferente do observado na natureza ou em tanques maiores que não refletem a imagem do peixe.

Outro problema relacionado ao comportamento dos peixes está ligado à baixa quantidade de água utilizada durante os experimentos. Com um volume de aproximadamente 700 ml no recipiente, os peixes tornavam-se mais vulneráveis ao estresse durante o período em que eram utilizados para a realização das filmagens, resultando em um comportamento anormal em relação ao que seria observado em condições naturais. Após identificar os problemas com a aquisição de imagens e às condições em que os peixes estavam sendo mantidos durante os experimentos, eles foram abordados gradualmente à medida que surgiam.

Ao final das melhorias, conseguimos reproduzir imagens de alta resolução, qualidade e estrutura mais robusta para a aquisição de dados mais confiáveis e que nos permitisse reproduzir as mesmas condições durante todas as filmagens realizadas.

Nossa estrutura experimental definitiva consiste em uma câmera Canon 6D, figura 3.4, juntamente com um conjunto de três lentes, são elas: Uma lente 75-300mm 1:4-5.6 III, macro 1.5m/4.9 ft; uma lente 24-105mm 1:4 L, macro 0.45m/1.5ft e uma compact-macro lens EF 50mm 1:2.5, todas de marca idêntica à câmera, sendo esta última a escolhida na configuração definitiva do experimento usada na captura dos vídeos.

A câmera utilizada nos permite ajustar de forma manual configurações de filmagens como o ISO (*International Organization for Standardization*) que pode ser ajustado para ajudar a controlar a exposição à luz em um ambiente, a abertura para controlar a profundidade de campo e a velocidade do obturador que permite controlar a quantidade de luz que entra na câmera. Com esses ajustes, usamos as configurações que melhor se adequavam à nossas necessidades, além da captura de vídeos à 30 fps e resolução em full HD (1920 x 1080).



Figura 3.4: Conjunto de câmera e lentes utilizadas para captura de imagens do *Danio rerio*.

Com a modificação do equipamento de filmagens anterior, houve a necessidade da aquisição de uma estrutura para suportar o peso do novo equipamento, garantir mais rigidez e menos problemas com movimentações ou oscilações da câmera durante as filmagens. Com isso, optamos por um perfilado 38x38mm perfurado, montado em duas partes como mostradas na figura 3.5: Uma estrutura vertical de maior porte, fixada à parede, consistindo de um “braço” horizontal acoplado a um perfilado vertical, configurando um ângulo de cerca de 90° e sustentado por

cabos de aço ancorados na parede. O braço é feito do mesmo perfilado usado fixado à parede, posicionado a uma altura de 1,45m da região a ser filmada, permitindo o ajuste da câmera para o ponto central da base do experimento. A base do experimento é composta por um tampo de vidro temperado 8mm com dimensões de 80x80cm, fixado à mesa, iluminado por um plafom com dimensões de 60x60cm, 40 Watts de potência e luz branca 6500K, conforme apresentado na figura 3.5b. A base do experimento garante maior resistência ao peso a qual é submetida durante o período de filmagens e a iluminação do plafom permite distribuições mais uniformes da luz.

Por último, a substituição do aquário de vidro por um recipiente circular de plástico com fundo plano, como apresentado na figura 3.5b. O recipiente tem diâmetro de 50cm e foi utilizado uma lâmina d'água de 5cm de espessura, fornecendo uma capacidade volumétrica maior, de aproximadamente 9,8 litros, em comparação com o aquário anterior. O novo recipiente é produzido em material opaco, o que reduz o reflexo dos peixes ao se aproximarem da borda, tornando-se um ambiente mais confortável para os peixes e adequado para as filmagens.



(a) Suporte para a câmera fixo à parede.



(b) Recipiente sobre tampo de vidro iluminado por plafon.

Figura 3.5: Montagem definitiva usada durante a realização dos experimentos.

Após as mudanças realizadas e toda a estrutura montada, as filmagens foram iniciadas seguindo etapas e roteiros bem definidos que são abordados na próxima subseção. Assim, como todo o processo de tratamento dos vídeos produzidos e aquisição dos dados de interesse.

### 3.2.1 Procedimentos Experimentais

Partindo para a aquisição de dados, todo o processo de filmagem foi predeterminado para garantir condições aproximadamente semelhantes em todas as realizações. Como já citado anteriormente, o peixe usado em nosso experimento é o *Danio rerio* que faz parte de um conjunto de animais criados no LECA. Durante os dias de filmagens os peixes eram transportados do LECA para o LaSCoU em aquários de acrílico, figura 3.6, e preparados para a realização dos experimentos. Juntamente com o aquário dos peixes, também era transportado uma quantidade

de água tratada de acordo com as especificações descritas na seção 3.1.1, suficiente para ser distribuída entre os aquários de transporte e os recipientes usados no experimento.



Figura 3.6: Aquário usado para transporte dos peixes.

Com os espécimes já no LaSCoU e o equipamento preso à estrutura, cumprimos os procedimentos de montagens, para só então iniciarmos as realizações das filmagens. Os procedimentos consistem em:

1. Prender a câmera ao suporte e conectá-la ao carregador, evitando que ocorra algum problema relacionado à carga da bateria em meio às filmagens;
2. Ligar a iluminação localizada abaixo da base do experimento e apagar as luzes do laboratório, para que a luz vindo de cima não cause reflexos na superfície da região a ser filmada, podendo atrapalhar o foco ou a identificação de indivíduos;
3. Transferir parte da água transportada do LECA para os recipientes do experimento, até formar uma lâmina d'água com espessura de 5cm;
4. Adicionar a quantidade de peixes referente ao tamanho do grupo que se deseja analisar, sendo os peixes escolhidos aleatoriamente do aquário de transporte e uma vez que usados em uma filmagem são devolvidos para outro recipiente e não são mais usados no dia em questão;
5. Verificar o foco da câmera, usando tanto o modo automático quanto o manual até atingir o ponto mais nítido possível, verificando a nitidez da imagem através do monitor;
6. Posicionar as proteções em volta da região de filmagens para evitar interferências externas que possam alterar o comportamento dos peixes.

Para garantir a adaptação dos peixes ao novo ambiente de filmagem, todos os animais passam por um período de aclimação de 10 minutos sobre a base já iluminada. Durante esse período, os peixes têm a oportunidade de se familiarizar com o ambiente e se acostumar com a iluminação. Somente após a aclimação, as filmagens são iniciadas com duração de 8 minutos e 30 segundos.

Durante a realização das filmagens utilizamos dois recipientes idênticos para que pudéssemos agilizar o processo. Enquanto um grupo de peixes estava sendo filmado, o grupo seguinte

estava sendo submetido ao período de aclimação. Ao término de uma filmagem, o processo é repetido até a conclusão de todas as realizações possíveis para o referente dia. Após a finalização das filmagens, verificamos se os peixes apresentaram algum comportamento incomum durante o período de exposição, como por exemplo permanecer muito tempo parado ou nadando muito rápido em comparação aos demais. Caso ocorra algum problema, outra filmagem é realizada em um dia posterior sob condições semelhantes e com o mesmo número de indivíduos que a filmagem a ser substituída. Com as realizações já concluídas e revisadas, os vídeos são tratados via FFMPEG, onde são recortados os primeiros e últimos 60 segundos de filmagens, evitando a presença de algum ruído ou interferência na filmagem, assim, resultando em uma arquivo final com 6 minutos e 30 segundos.

Já com o arquivo final, utilizamos o software IdTracker [56], figura 3.7. Trata-se de um programa computacional responsável por identificar e rastrear indivíduos em uma dada região. Para o nosso caso, utilizamos o IdTracker para digitalizar os peixes em nossos experimentos. Antes do processamento dos vídeos, o programa nos permite determinar parâmetros como número de indivíduos, intensidade e tamanho mínimo do objeto a ser rastreado, intervalo de processamento de rastreo e taxa de quadros a serem registrados. O IdTracker também possibilita selecionar a região de interesse que se deseja digitalizar, evitando processamento de regiões desnecessárias.

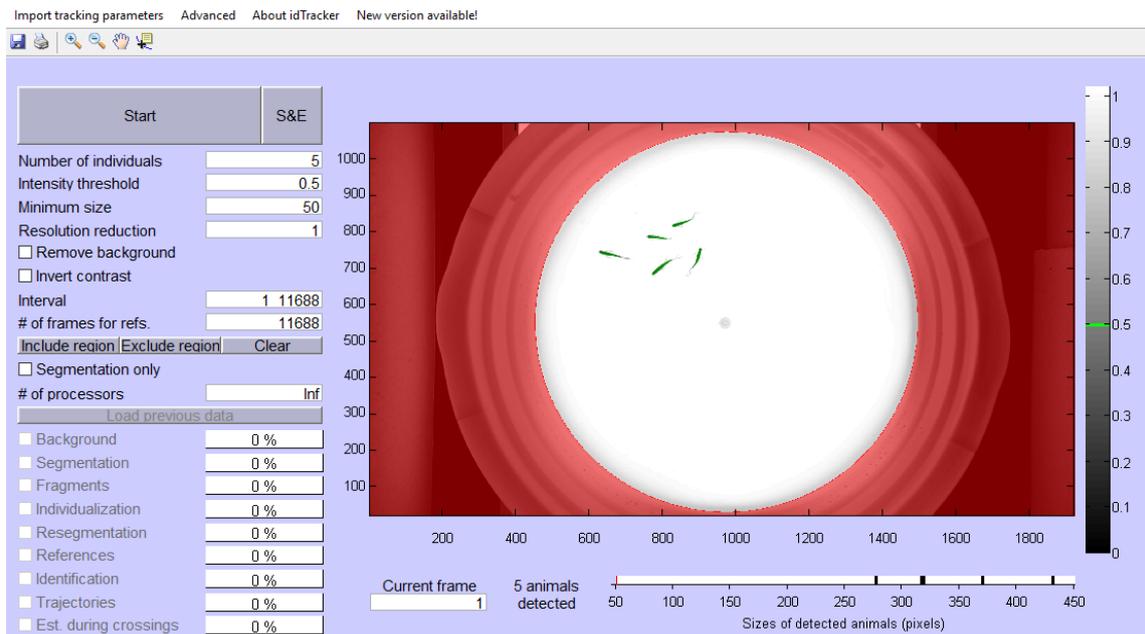


Figura 3.7: Interface do IdTracker.

Além das configurações citadas, o programa também conta com a remoção de fundos estáticos, facilitando o reconhecimento de objetos que estão em movimento, bem como a capacidade de identificar os indivíduos ao passarem por alguma obstrução ou após oclusões. Porém essa funcionalidade é limitada para pequenas distâncias e poucos indivíduos envolvidos. Em situações com um certo número de indivíduos em áreas pequenas, onde os mesmos podem sobrepor

uns aos outros, o programa apresenta problemas em definir quais as posições destes indivíduos envolvidos.

Embora o IdTracker seja capaz de identificar e rastrear os indivíduos, em casos de aumento da densidade de peixes por área no recipiente, pode ocorrer a perda da identificação de alguns indivíduos por alguns quadros devido a oclusões ou aglomerações de muitos indivíduos em regiões específicas do recipiente, resultando em alguns pontos com valores NAN (*Not a Number*) no arquivo gerado pelo programa. Porém, este problema pode ser resolvido realizando uma interpolação linear dos pontos perdidos, permitindo obter a trajetória contínua de cada peixe.

Após a digitalização dos vídeos, o IdTracker nos fornece um registro preciso das posições  $x$  e  $y$  de cada indivíduo do grupo, bem como um vídeo ilustrativo apresentando a identificação de cada peixe e sua trajetória, como representado na Figura 3.8. Com base nestes dados digitalizados, é possível calcular uma série de parâmetros importantes, incluindo a velocidade de cada peixe, polarização, agregação, D-centroide, e outros fatores relacionados, como o impacto dos vizinhos mais próximos.

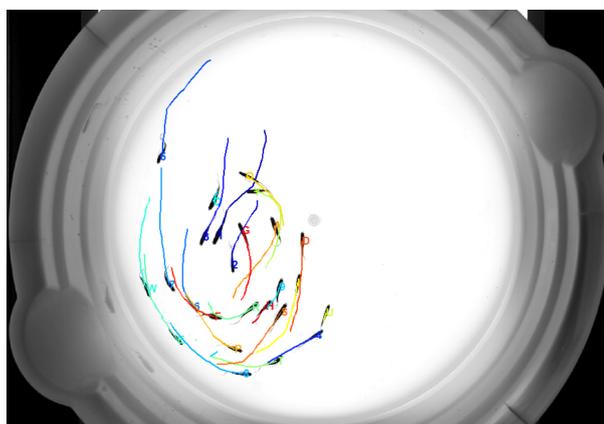


Figura 3.8: Captura de um quadro referente ao vídeo do processamento de identificação e rastreamento do IdTracker.

Após a coleta dos dados por meio do software IdTracker, promovemos a conversão das unidades de medida referentes às posições dos peixes de pixel para centímetros, adotando um intervalo de tempo de  $1/30s$  e referenciando as unidades com base no raio efetivo do recipiente. Visando à centralização do sistema, empregamos o ponto  $R = 0$  como referência, coincidindo com o centro do recipiente.

Para cada grupo de  $N$  indivíduos, foram realizados cinco registros, com diferentes peixes escolhidos aleatoriamente. Após a digitalização pelo IdTracker, cada registro gerou uma série temporal das trajetórias individuais dos peixes, totalizando 11.688 pontos em cada série. Ao final, os cinco registros contendo as séries temporais adquiridas, geraram uma série temporal de aproximadamente 58.500 pontos para cada parâmetro analisado.

A série temporal obtida pela soma dos cinco registros de cada grupo foi utilizada nas análises posteriores das curvas da função densidade de probabilidade (PDF) da polarização, agregação e D-centroide, bem como no cálculo dos valores médios em função da densidade de área para cada parâmetro correspondente.

## Resultados e Análises

Neste capítulo apresentamos as análises dos dados experimentais obtidos no *LaSCoU* referentes aos diversos grupos de *Danio rerio*. Os cálculos foram realizados a partir das trajetórias de cada indivíduo capturada durante o período de filmagens. Utilizamos a análise dos parâmetros de ordem da polarização, agregação e D-centroide para investigar como esses parâmetros se relacionam com o comportamento coletivo dos grupos de *Danio rerio* conforme ocorre a variação da densidade. Para verificação e validação dos nossos dados experimentais, realizamos uma comparação com os resultados [51, 43]. A partir das trajetórias conseguimos caracterizar o comportamento de *school* e *shoal* com a variação da densidade  $\rho$ . E, por fim, verificamos a influência do número de indivíduos na correlação entre eles por meio da variação dos parâmetros da polarização, agregação e D-centroide com auxílio do parâmetro q-gaussiano.

### 4.1 Polarização

A partir das séries temporais obtidas, calculamos a polarização para todos os grupos de *Danio rerio*. Na Figura 4.1, podemos observar o comportamento qualitativo dos peixes à medida que ocorre o aumento da densidade. Para verificar a consistência dos nossos resultados experimentais, realizamos uma comparação com os estudos mencionados anteriormente, representados nas Figuras 4.2a e 4.2b.

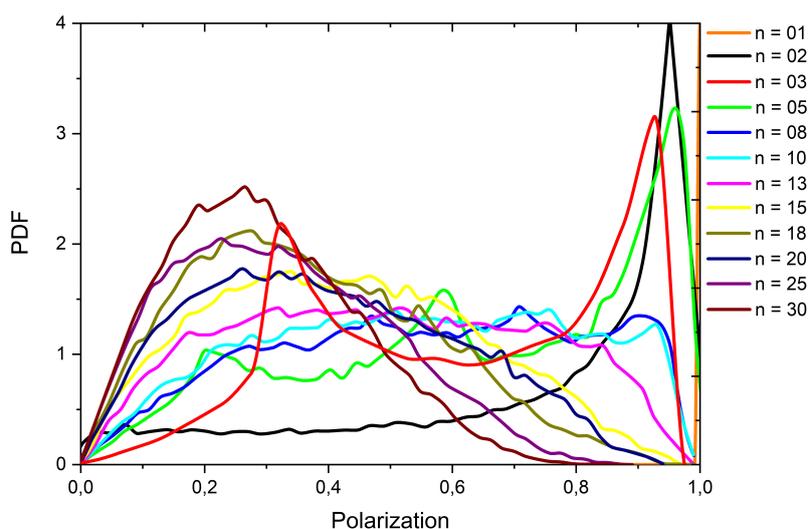
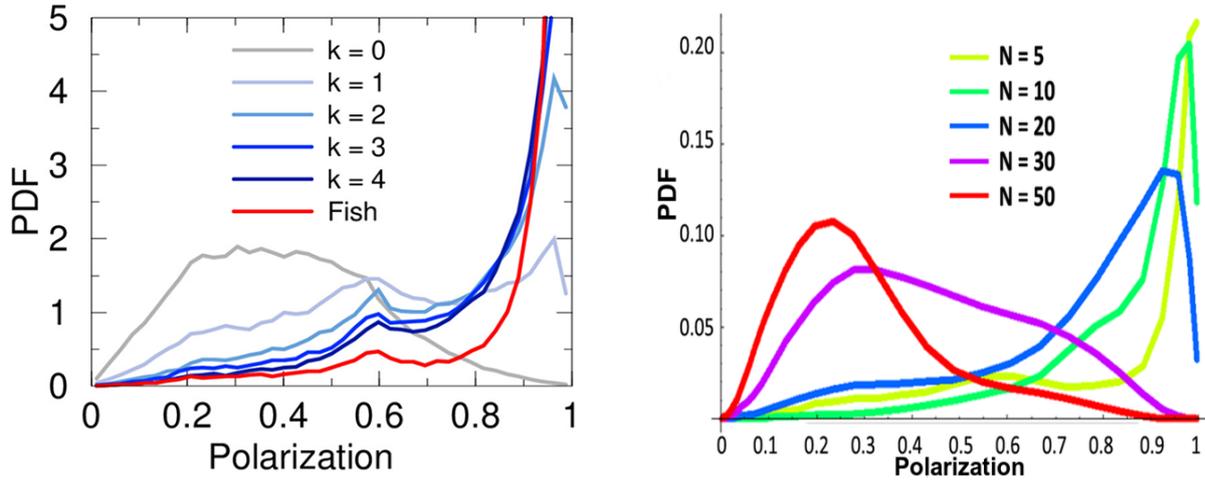


Figura 4.1: PDF da polarização para todos os  $N$  grupos analisados.

Ao analisar os gráficos 4.2a e 4.2b, notavelmente encontramos uma concordância entre nossos resultados, referente ao comportamento das curvas para os valores iguais entre os experimentos com  $N = 5$ . Também é possível observar a diminuição da polarização recorrente do aumento do número de peixes no gráfico da figura 4.2b, assim como em nossos resultados, figura 4.1.



(a) PDF da polarização com  $N = 5$  (curva vermelha) e tanque com  $R = 25\text{cm}$  e lâmina d'água de  $7\text{cm}$ . Retirado de [43].

(b) PDF da polarização para  $N$  peixes em tanque com  $R = 45,5\text{cm}$  e lâmina d'água de  $10\text{cm}$ . Retirado de [51].

Figura 4.2: Gráficos das PDFs da polarização usadas para comparação com nossos resultados.

Os gráficos das PDF para a polarização podem ser explicados como uma representação visual da distribuição de probabilidade da polarização das partículas, ou seja, a PDF é uma medida de quão provável é a ocorrência de determinado valor de polarização. Tanto para os gráficos 4.2a e 4.2b, quanto para nossos resultados do gráfico 4.1, em  $N = 5$ , podemos observar alguns picos específicos ao longo das curvas das PDF. Para o pico em  $P = 1$ , a polarização é máxima e todos os peixes estão alinhados e se deslocam na mesma direção. Em  $P \approx 0,6$ , a organização do sistema apresenta um dos peixes do grupo orientado de forma oposta em relação aos outros indivíduos, resultando no surgimento de vetores colineares e consequentemente no cancelamento dos mesmos, assim  $P = |(1 + 1 + 1 + 1 - 1)|/5 = 3/5$ . De forma semelhante, em  $P \approx 0,2$ , dois peixes encontram-se em direções opostas em relação aos demais, com isso,  $P = |(1 + 1 + 1 - 1 - 1)|/5 = 1/5$ . A configuração descrita segue o mesmo exemplo apresentado na figura 2.2. Os picos mencionados para  $N = 5$  podem ser observados com maior facilidade para valores pequenos de  $N$ , como  $N = 2$  e  $3$ . Para valores maiores de  $N$ , os números de possíveis arranjos entre os indivíduos tornam-se maiores. Isso resulta em uma distribuição com uma aparência mais uniforme, sem picos proeminentes.

A mudança de comportamento dos peixes, de *school* para *shoal*, pode ser observada qualitativamente na figura 4.3, ao analisar as trajetórias dos peixes entre os grupos com  $N = 13$  e  $N = 30$  na figura 4.3b, e os gráficos da série temporal da polarização para  $N = 2, 13$  e  $30$ , na figura 4.3c, que mostram uma diminuição da polarização e de suas flutuações à medida que a densidade no recipiente aumenta.

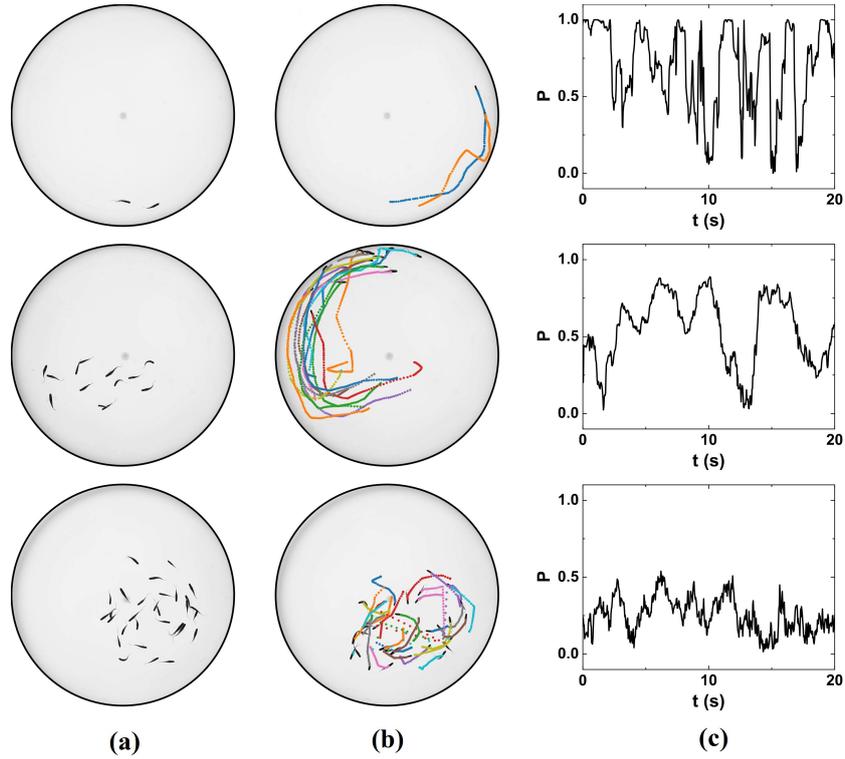


Figura 4.3: (a) Imagem vertical do experimento para  $N = 2, 13, 30$  peixes no tanque de raio igual a 25cm. (b) Trajetórias dos peixes por 3s. (c) Série temporal de polarização.

A fim de compreender quantitativamente o comportamento de *school* e *shoal*, calculamos a média  $\langle P \rangle$ , equação 4.2, da polarização das PDF apresentadas na figura 4.1. Sendo a média, calculada a partir do somatório  $\langle P_i \rangle$  das cinco séries temporais obtidas para cada  $N - grupo$  dado por:

$$\langle P_i \rangle = \sum_{i=1}^5 P_i(t) \quad (4.1)$$

onde  $P_i(t)$  é a polarização do  $i$ -ésimo grupo calculada a partir das séries temporais obtidas da equação 2.1, com somatório realizado sob as 5 séries temporais obtidas para cada grupo com número  $N$  de peixes.

$$\langle P \rangle = \frac{1}{\eta} \sum_t \langle P_i \rangle \quad (4.2)$$

sendo  $\eta$  é o tamanho da série temporal de cada grupo e  $P_i(t)$  é a polarização do  $i$ -ésimo grupo calculada a partir das séries temporais obtidas da equação 2.1.

Os valores médios da polarização em função da densidade de área  $\rho = N/A$  de peixes no nosso recipiente são mostrados na figura 4.4, onde podemos notar dois comportamentos distintos ajustados por leis de potência (linhas sólidas) do tipo  $\langle P \rangle \propto \rho^{-\beta}$ , seguidos de suas

respectivas barras de erro (faixas espessas em tons claros de azul e vermelho). A inclinação de uma lei de potência pode indicar uma mudança de comportamento, uma vez que tal relação descreve um comportamento não-linear que pode variar em diferentes faixas de valores. Conforme a densidade  $\rho$  aumenta, é possível observar uma mudança de comportamento no valor médio de polarização. O primeiro ajuste (linha azul) é estabelecido com o melhor ajuste para os dados até um ponto limite, a partir do qual um segundo ajuste (linha vermelha) é adicionado para melhor capturar o comportamento posterior, ambos ajustes também acompanhados das respectivas barras de erro em cada ponto, obtidas através do desvio padrão da média. A mudança na inclinação das linhas ajustadas, com valores dos expoentes obtidos em cada ajuste, sendo  $\beta = -(0,26 \pm 0,02)$  e  $\beta = -(0,56 \pm 0,04)$ , respectivamente, ocorre em torno do ponto  $N = 13$ , sugerindo uma transição de fase de não-equilíbrio entre os comportamentos de *school* e *shoal*.

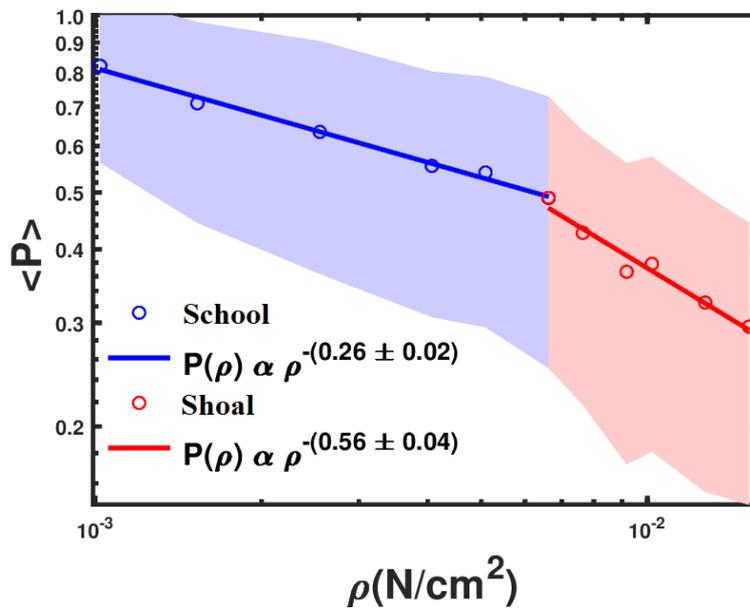


Figura 4.4: Gráfico log-log da polarização média (círculos vazados), ajustes leis de potência (linhas sólidas), para  $N = 2, 3, 5, 8, 10$  e  $13$  (linha azul),  $N = 13, 15, 18, 20, 25$  e  $30$  (linha vermelha). Os ajustes acompanha sua respectiva barra de erro em uma faixa larga de mesma cor do ajuste correspondente.

No primeiro ajuste, onde é caracterizado o comportamento de *school*, a polarização média diminui suavemente com o aumento da densidade, seguindo a relação  $\langle P \rangle \propto \rho^{-0,26}$ , sugerindo que os peixes exibem movimento coordenado e correlacionado entre seus vizinhos. No segundo ajuste, correspondente ao comportamento de *shoal*, a polarização média decai de forma mais abrupta, com  $\langle P \rangle \propto \rho^{-0,56}$ , indicando que os peixes apresentam movimentos não correlacionados desordenado entre seus vizinhos. O movimento correlacionado pode ser analisado por meio do comprimento de correlação, o qual permite medir a distância típica em que um indivíduo pode ser considerado correlacionado com seus vizinhos [41, 53, 13, 60]. Além disso, a variação da correlação também pode ser verificado através da formação não-gaussiana de caudas longas

nas distribuições dos incrementos dos parâmetros analisados, que podem ser estudados a partir da utilização da distribuição q-gaussiana.

Através da análise do gráfico presente na figura 4.5, podemos observar que cada valor de  $N$  apresenta características específicas. Notavelmente, para valores pequenos de  $N$ , as distribuições dos incrementos da polarização  $\delta P = [P(t + \delta t) - P(t)]$  apresentam caudas longas e picos estreitos. Conforme o valor de  $N$  aumenta, essa tendência diminui e os picos tornam-se menos acentuados. As caudas longas significam que grandes eventos, como movimentos coordenados intensos que ocorrem em momentos específicos, como mudanças bruscas de direção ou velocidade ocorrem com certa frequência. Esses eventos podem gerar flutuações extremas e, conseqüentemente, contribuir para a presença de caudas longas nas distribuições. Para interpretar essas distribuições, utilizamos uma função q-Gaussiana para fazer o ajuste e buscar caracterizar as correlações entre os comportamentos dos peixes.

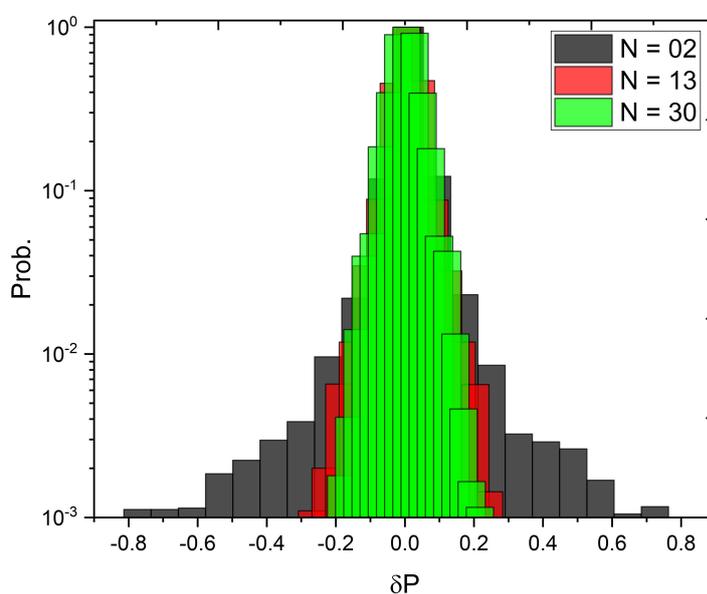


Figura 4.5: Histograma da  $\delta P$  para os grupos com  $N = 2$ ,  $N = 13$  e  $N = 30$ .

Relacionando a descrição dos resultados da figura 4.4, analisando a mudança de comportamento entre *school* e *shoal* em relação ao fato de que os peixes passam de um arranjo que os indivíduos apresentam correlação entre seus vizinhos e um comportamento coordenado, para um arranjo não correlacionado entre os indivíduos, resultando em um grupo desordenado e baixa polarização. Verificamos as distribuições da polarização  $\delta P$ , apresentada na figura 4.5, que quantifica a taxa de variação da polarização ao longo do tempo e pode ser relacionada com a correlação entre os indivíduos no sistema.

Em sistemas altamente correlacionados, as flutuações da polarização são reduzidas, indicando que as mudanças ocorrem de forma lenta e coordenada. Por outro lado, em sistemas pouco correlacionados, as flutuações da polarização são maiores, indicando que as mudanças ocorrem de maneira rápida e não coordenada. Com isso, podemos estabelecer uma relação entre a velocidade de mudança da polarização  $\delta P$ , e a correlação entre os indivíduos por meio de

uma distribuição q-gaussiana. Essa distribuição é comumente encontrada em sistemas complexos que apresentam correlações a longo alcance e podem ser utilizadas para indicar a presença dessas correlações entre os indivíduos do grupo. A relação entre a velocidade de polarização  $\delta P$  e a distribuição q-gaussiana são representadas no gráfico da figura 4.6, para os grupos com  $N = 2, 13$  e  $30$ .

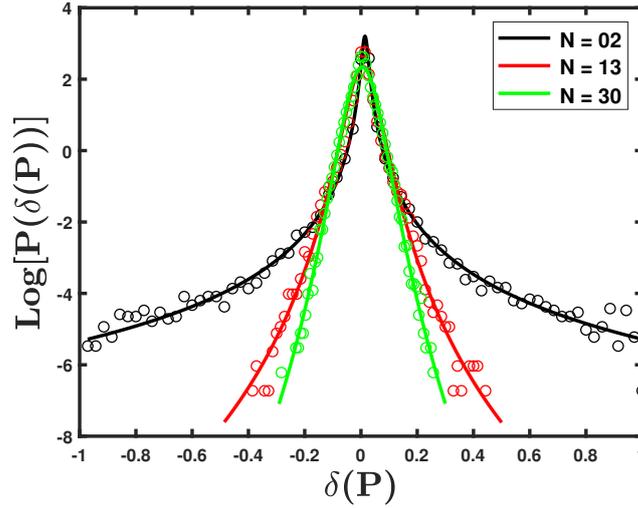


Figura 4.6: Gráfico das PDF de  $\delta P$  para  $N = 2$  (círculos pretos),  $N = 13$  (círculos vermelhos) e  $N = 30$  (círculos verdes). As linhas sólidas representam a distribuição q-gaussiana que melhor se ajusta aos pontos (cada linha e círculos correspondentes do valor de  $N$ , são representados pela mesma cor).

Ao serem comparados a uma distribuição gaussiana em uma mesma situação, esses eventos podem ser considerados como raros, uma vez que apresentam uma probabilidade de ocorrência significativamente menor. O ajuste observado no gráfico da figura 4.6, foi realizado usando uma PDF do tipo q-gaussiano, que por sua vez é dada por:

$$Q(x) = \frac{\sqrt{\beta}}{C_q} [1 + (q-1)\beta(x-x_0)^2]^{-\frac{1}{q}}, \quad (4.3)$$

onde

$$C_q = \frac{\sqrt{\pi}\Gamma(\frac{3-q}{2(q-1)})}{\sqrt{q-1}\Gamma(\frac{1}{q-1})}, \quad 1 < q < 3, \quad (4.4)$$

sendo  $\beta$  a largura da distribuição,  $x_0$  a média e o expoente  $q$  é o parâmetro de ajuste que pode variar entre 1 e 3, sendo valores próximos de 1, uma distribuição com comportamento gaussiano e valores próximos de 3, distribuições com comportamento não-gaussiano de caudas longas.

Os valores obtidos para cada curva observada no gráficos da figura 4.6, são descritos na tabela 4.1, juntamente com o valor do ajuste ou  $R^2$  (*rsquare*) atribuído a cada curva. O  $R^2$  é

uma medida que varia de 0 a 1 e indica o quão bem um modelo de regressão se ajusta aos dados e, quanto mais próximo de 1 for o valor de  $R^2$ , melhor o modelo de regressão se ajusta aos dados.

N	q	$R^2$
2	$2,03 \pm 0,09$	0,98
13	$1,38 \pm 0,08$	0,98
30	$1,24 \pm 0,04$	0,99

Tabela 4.1: Valores dos ajustes q-gaussiano com melhor  $R^2$  sob os pontos experimentais dos incrementos da polarização com  $N = 2, 13, 30$  indivíduos.

Para as curvas das PDF caracterizadas pela equação 4.3 e utilizadas nos ajustes no gráfico da figura 4.6, temos que as mesmas tendem a uma distribuição do tipo gaussiana conforme o valor de  $q$  se aproxima de 1. Para valores pequenos de  $N$ , como  $N = 2$ , a curva exibe um pico estreito e prolongado, bem como caudas longas, características essas, de uma distribuição não gaussiana. Porém, para valores elevados de  $N$ , essas características ficam menos evidentes. À medida que observamos as curvas em vermelho e verde, as caudas tornam-se menos longas e os picos tendem a apresentar formas mais abauladas, tendendo a uma distribuição cada vez mais do tipo gaussiana, indicando uma transição das PDF de uma distribuição não gaussiana com grupos formados de poucos indivíduos, para uma distribuição gaussiana com grupos formados por muitos indivíduos.

A perda de correlação entre os indivíduos em relação ao aumento da densidade pode ser explicada através da análise dos incrementos da polarização ( $\delta P$ ) ajustada por uma q-gaussiana, e pode ser utilizada para esclarecer as características de cada comportamento observado. Onde inicialmente, observa-se uma queda gradual da polarização média, seguida por uma queda mais abrupta em um instante subsequente. Quando os indivíduos de um grupo estão altamente correlacionados, a mudança na polarização ocorre lentamente e de maneira coordenada, resultando em uma distribuição de  $\delta P$  com uma cauda pesada, ajustada por uma q-gaussiana. No entanto, à medida que a correlação entre os indivíduos diminui, a mudança na polarização se torna mais rápida e menos coordenada, resultando em uma distribuição de  $\delta P$  com uma cauda estreita e picos menos acentuados, tendendo para uma distribuição gaussiana. A transição de indivíduos altamente correlacionados para não correlacionados pode ser quantificada pela redução do valor de  $q$  conforme a distribuição q-gaussiana se aproxima de uma gaussiana. Esse comportamento ocorre simultaneamente com a transição do grupo de um ambiente de baixa densidade (poucos indivíduos) para um ambiente de alta densidade (muitos indivíduos).

## 4.2 Agregação

Considerando que as agregações em grupos de peixes podem ser caracterizadas por suas particularidades, como o grau de organização do grupo que se refere ao nível de coordenação e sincronização entre os indivíduos, além do movimento individual de cada animal em relação aos seus vizinhos, é possível definir essas características por meio de sua coesão, padrão

de movimento, estrutura espacial, interações sociais e dependências da densidade, conforme discutido na seção 2.3.2. Nesse contexto, estabeleceu-se uma relação entre o alinhamento dos indivíduos e a densidade, bem como a influência dos vizinhos no comportamento de cada indivíduo e na distribuição espacial do grupo. Com isso, a agregação é abordada de acordo com a configuração do grupo que atua como um único organismo, considerando um menor círculo que abrange todos os  $N$  peixes, definida como a agregação  $A(t)/R \in [0, 1]$ , onde  $R$  é o raio do recipiente. Dessa forma, para valores de  $A(t)$  pequeno, é considerado o grupo altamente coeso\compacto, enquanto para valores de  $A(t)$  cada vez mais próximos do raio do recipiente, temos grupos dispersos ocupando maiores regiões. Assim como para a polarização (seção 4.1), analisamos as PDF da agregação, figura 4.7, seguindo os mesmos valores de  $N$ .

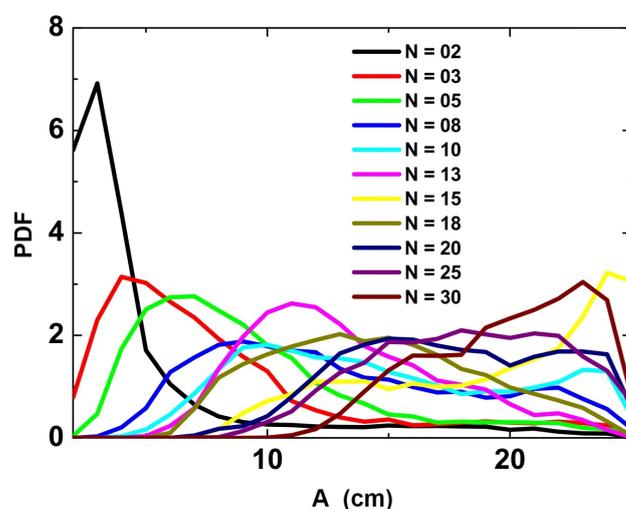


Figura 4.7: Gráfico das PDF da agregação para todos os  $N$  grupos analisados.

A partir das PDF apresentadas na figura 4.7, podemos estudar a evolução temporal do menor círculo envolvente à medida que o número  $N$  de indivíduos no grupo aumenta. Observa-se que, para valores  $N \leq 5$ , os indivíduos apresentam uma tendência a se manterem em proximidade, formando uma configuração compacta ( $\approx 5\text{cm}$ ) a maior parte do tempo. Para  $N = 8, 10, 13$ , é possível notar que há um pequeno aumento do raio de agregação, mas ainda assim apresentam uma estrutura compacta, mantendo um tamanho médio de aproximadamente  $10\text{cm}$ . Dos valores de  $N$  maiores que 13, são observadas agregações mais dispersas ocupando áreas próximas ao raio total do recipiente, o que consideramos natural pois, conforme o número de indivíduos aumentam, o raio de agregação também aumenta. Mas, é importante lembrar que trabalhamos com estruturas finitas, logo, em algum momento o raio de agregação se tornaria constante, independente do número de indivíduos no recipiente.

Por meio da análise das PDF da agregação, é possível estabelecer uma relação em torno de  $N = 10$ , entre o comportamento de agregação dos peixes, estabelecendo dois comportamentos distintos, que torna-se mais perceptível ao observar as agregações médias de cada grupo, figura 4.8. Além disso, a mudança de comportamento do raio de agregação pode ser observada qualitativamente ao analisar as diferentes configurações adotadas pelos peixes, destacadas na figura 4.3, conforme  $N$  varia. Podemos obter a média  $\langle A \rangle$ , equação 4.6, a partir do somatório 4.5,

das séries temporais da agregação  $A(t)$  realizadas para cada um dos  $N$ -grupos. Os resultados obtidos estão representados graficamente na figura 4.8.

$$\langle A_i \rangle = \sum_{i=1}^5 A_i(t) \quad (4.5)$$

onde  $A_i(t)$  é a agregação do  $i$ -ésimo grupo, com somatório realizado sob as 5 séries temporais obtidas para cada grupo com número  $N$  de peixes.

$$\langle A \rangle = \frac{1}{\eta} \sum_t \langle A_i \rangle \quad (4.6)$$

sendo  $\eta$  o tamanho da série temporal de cada grupo e  $\langle A_i \rangle$  o somatório das agregações do  $i$ -ésimo grupo.

A média das agregações em relação à densidade de área ( $\rho$ ), conforme mostrado na figura 4.8, foram ajustadas por meio de uma lei de potência, dada por  $\langle A \rangle \propto \rho^\beta$ . Foi realizado um primeiro ajuste para as agregações com  $N = 2, 3, 5, 8$  e  $10$ , seguido de um segundo ajuste para agregações com  $N = 10, 13, 15, 18, 20, 25$  e  $30$ . A inclinação das curvas ajustadas pelo modelo de lei de potência aos dados nos forneceu os valores de expoente  $\beta = (0,66 \pm 0,07)$  e  $\beta = (0,34 \pm 0,13)$ , respectivamente, para cada ajuste. A alteração do parâmetro beta pode ser um indicativo da resposta comportamental dos indivíduos a variações na densidade, os quais tendem a adotar uma estrutura de agregação mais dispersa em grupos com maior número de indivíduos, conforme o tempo transcorre.

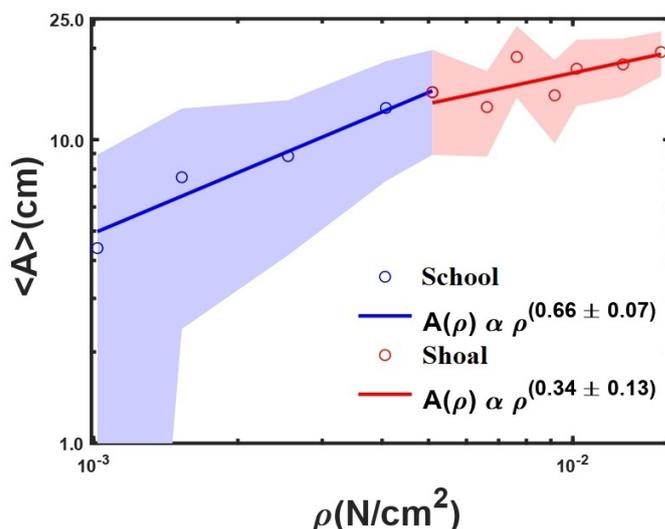


Figura 4.8: Gráfico log-log das agregações médias (círculos vazados) para os  $N$ -grupos em função da densidade  $\rho$ . As linhas sólidas representam ajustes de lei de potência. Para  $N = 2, 3, 5, 8, 10$ , linha azul e  $N = 10, 13, 15, 18, 20, 25, 30$ , linha vermelha. Cada ajuste acompanha sua respectiva barra de erro (obtidas através do desvio padrão das séries) em faixas largas com tons mais claros de suas cores.

No primeiro momento, com  $N \leq 10$ , os indivíduos exibem uma configuração preponderante de estrutura compacta. Tal padrão corresponde ao comportamento de *school* caracterizado pela sincronização e organização dos indivíduos em baixas densidades, conforme indicado pelo parâmetro de polarização. Já os grupos com  $N \geq 10$ , tendem a exibir um raio de agregação maior e uma estrutura de agregação menos compacta, composta por indivíduos que se movem de forma desordenada e com baixa polarização. Conforme  $N$  aumenta, esses grupos perdem gradualmente as características típicas de *school*, tornando-se apenas um grupo agregado ou um grupo com características de *shoal*. É importante lembrar que a perda de polarização entre os indivíduos em grupos de animais pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a densidade do grupo e a capacidade de processamento de informações sensoriais pelos indivíduos. A sobrecarga de informação visual em um ambiente muito denso pode resultar em estresse e comportamento desordenado, contribuindo para a perda de organização do grupo.

Ao analisar as distribuições dos incrementos da agregação  $\delta A = [A(t + \delta t) - A(t)]$ , conforme ilustrado na figura 4.9, observou-se uma tendência de formação de caudas longas à medida que o valor de  $N$  aumenta. Este comportamento pode ser interpretado como um indício da presença de correlações de longo alcance no sistema, o que pode ter importantes implicações para o comportamento de agregação do sistema em questão. Para investigar a presença dessas correlações de longo alcance, aplicamos a q-gaussiana, equação 4.3, como ajuste das distribuições da figura 4.9 e caracterizamos essas correlações.

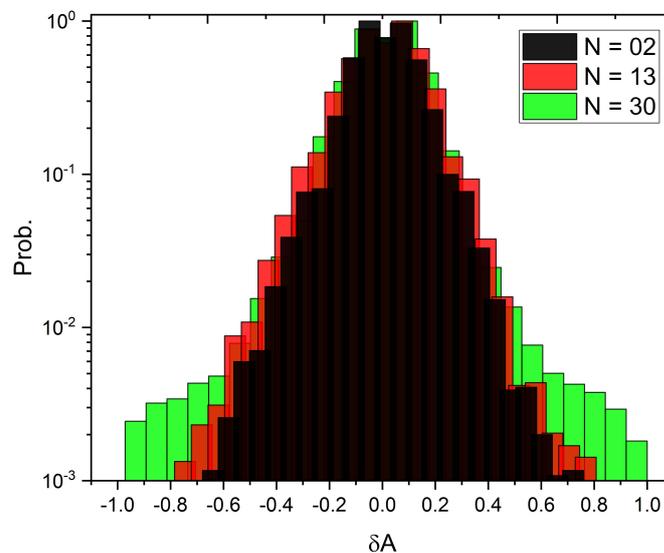


Figura 4.9: Histograma da  $\delta A$  para os grupos com  $N = 2$ ,  $N = 13$  e  $N = 30$ .

Mediante o ajuste dos dados de  $\delta A$  em uma distribuição q-gaussiana, é possível mensurar o aumento ou diminuição de correlações de longo alcance entre indivíduos dos grupos. A figura 4.10 ilustra graficamente os ajustes realizados pelas curvas (linha sólida) com os melhores valores com  $R^2$  encontrados em cada ajuste. A análise da figura 4.10 e dos valores de “q” expostos na tabela 4.2, que correspondem às distribuições q-gaussianas, indica que nas agregações dos peixes, as distribuições do raio de agregação ( $\delta(A)$ ) tendem a não seguir uma distribuição gaus-

siana. Isso fica evidente pelo valor do parâmetro “ $q$ ” atribuído a cada uma das curvas, que se afasta do valor 1, atribuído a uma distribuição gaussiana, à medida que o número de indivíduos analisados se aproxima do valor máximo investigado em nossos experimentos.

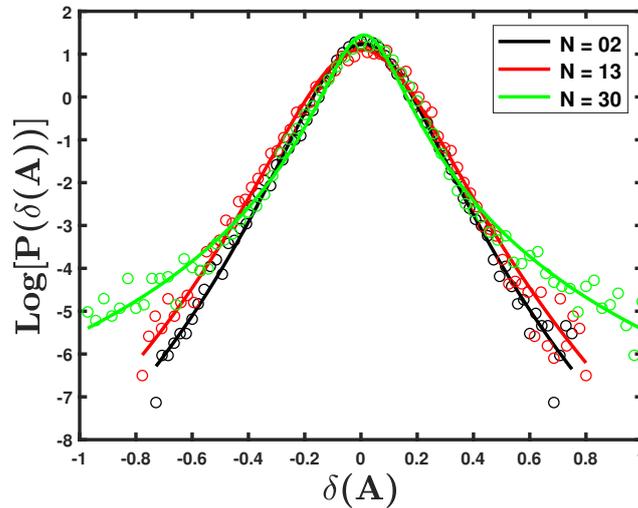


Figura 4.10: Gráficos das PDF da  $\delta A$  para  $N = 2$  (círculos pretos),  $N = 13$  (círculos vermelhos) e  $N = 30$  (círculos verdes). As linhas sólidas representam a  $q$ -gaussiana que melhor se ajusta aos pontos.

$N$	$q$	$R^2$
2	$1,28 \pm 0,06$	0,98
13	$1,27 \pm 0,07$	0,98
30	$1,59 \pm 0,08$	0,98

Tabela 4.2: Valores dos ajustes  $q$ -gaussiano com melhor ajuste sob os pontos experimentais dos incrementos da agregação com  $N = 2, 13, 30$  indivíduos.

As PDF caracterizadas pela equação 4.3 e empregadas nos ajustes da figura 4.10 exibem picos mais estreitos e longos, juntamente com caudas longas para valores crescentes de  $N$ . Neste contexto, a transição ocorre de distribuições gaussianas para grupos menores de indivíduos para uma distribuição não-gaussiana para grupos maiores, o que indica um aumento na correlação entre os indivíduos para valores mais elevados de  $\rho$ . Esse comportamento pode ser justificado pelo fato de que, à medida que o tamanho do grupo aumenta, as interações entre os indivíduos se tornam mais frequentes, em um esforço para manter o grupo compacto.

### 4.3 D-centroide

Como último parâmetro abordado em nosso trabalho, a distância do D-centroide  $D(t)$  do grupo em relação à parede do recipiente, assim como os outros já mencionados, é utilizado

como medida para análise comportamental dos grupos de peixes. O D-centroide representa a posição média do grupo e fornece informações sobre a organização espacial e deslocamento coletivo dos indivíduos. Adicionalmente, a análise do D-centroide é útil para compreender a resposta dos grupos de peixes a variações ambientais, tais como mudanças na densidade a partir da variação do número de peixes presentes em uma determinada região, como abordado na seção 2.3.3. Para tanto, foram realizadas medições do D-centroide para os  $N$ -grupos de peixes variando de 2 a 30 indivíduos. Os resultados das PDF obtidas a partir de  $D(t)$  para cada valor de  $N$  podem ser visualizados na figura 4.11.

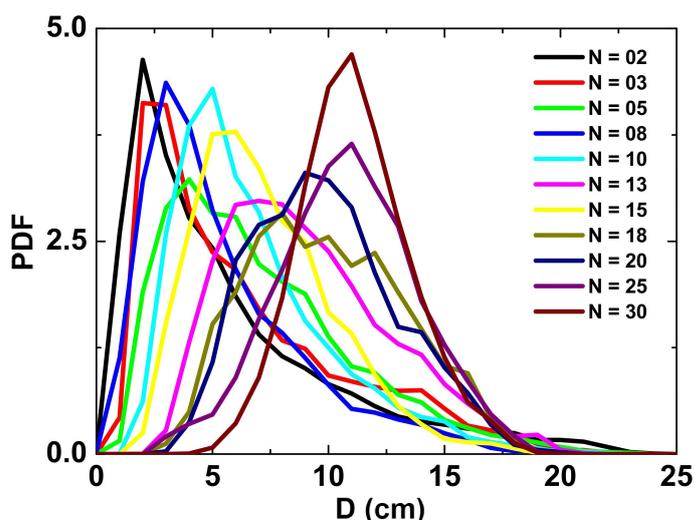


Figura 4.11: Gráfico das PDF do D-centroide para todos os  $N$  grupos analisados.

As PDF da figura 4.11 apresentam uma mudança de comportamento ao longo da evolução temporal do D-centroide para os valores de  $N$  observados. A partir desse gráfico, podemos analisar como as distâncias do centro de massa do grupo em relação à parede do recipiente se comporta e como a mudança de comportamento está relacionada com fatores como a variação da densidade do grupo. A transição de comportamento das distribuições ocorrem de forma mais significativa em torno de  $N = 13$ , os grupos anteriores ( $N \leq 13$ ), permanecem preferencialmente em regiões próximas à parede do aquário. Esse comportamento é coerente com estudos que investigam o fenômeno de “*edge-following*”, que descreve a tendência de alguns animais de seguir a borda de um ambiente desconhecido. No entanto, os grupos com menos peixes também dispõem de menor densidade e com isso, indivíduos mais organizados e um grupo mais compacto. Essa organização favorece a troca de informações entre os vizinhos e a preferência de um comportamento de *school*.

Para grupos com  $N \geq 13$ , é observado que os indivíduos apresentam um comportamento que resulta em um aumento da distância em relação à parede do recipiente. Esse comportamento é proporcional ao aumento de densidade e é observado mais facilmente no gráfico da figura 4.12, onde é mostrado o valor médio do D-centroide para cada um dos  $N$  grupos. Essa característica está associada ao comportamento de *shoal*, em que os indivíduos tendem a se organizar em grupos menos compactos. A formação de agregações mais dispersas conduz ao afastamento do

centro de massa do grupo em relação à parede do recipiente, fazendo com que os indivíduos ocupem regiões mais próximas da região central.

Por meio dos valores médios  $\langle D \rangle$  do D-centroide, equação 4.8, analisamos o comportamento dos grupos em torno de  $N = 13$ , sendo a partir deste ponto que os indivíduos apresentam maior diferença no deslocamento ao longo da parede, que pode ser observado ao observar as diferentes configurações adotadas pelos peixes, destacadas na figura 4.3. As médias das PDF para o deslocamento D-centroide  $D(t)$  foram obtidas por meio do cálculo de  $\langle D \rangle$ , dado por:

$$\langle D_i \rangle = \sum_{i=1}^5 \langle D_i(t) \rangle \quad (4.7)$$

onde  $D_i$  é o D-centroide do  $i$ -ésimo grupo a partir das séries temporais obtidas da equação 2.2. O somatório refere-se às 5 realizações feitas para cada grupo com número  $N$  de peixes.

$$\langle D \rangle = \frac{1}{\eta} \sum_t \langle D_i \rangle \quad (4.8)$$

sendo  $\eta$  é o tamanho da série temporal de cada grupo e  $\langle D_i \rangle$ , o somatório dos D-centroides das cinco realizações obtidas para o  $i$ -ésimo grupo.

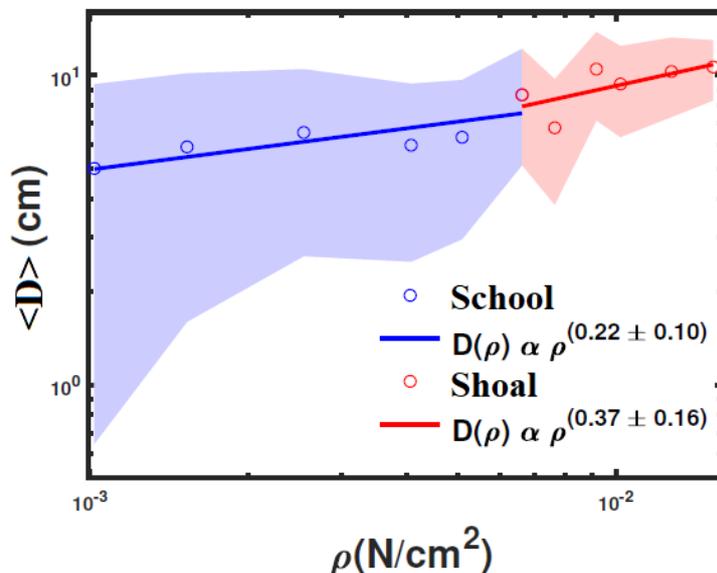


Figura 4.12: Gráfico log-log dos D-centroides médios (círculos vazados) para todos os  $N$  analisados, em função de  $\rho$ . As linhas sólidas representam ajustes de lei de potência com melhor ajuste. Para  $N = 2, 3, 5, 8, 10, 13$ , linha azul e  $N = 13, 15, 18, 20, 25, 30$ , linha vermelha. Cada ajuste acompanha sua respectiva barra de erro (obtidas a partir do desvio padrão das séries temporais) em faixas largas com tons mais claros de suas cores.

As médias dos D-centroides foram ajustadas por uma lei de potência, expressa como  $\langle D \rangle \propto \rho^\beta$ . Para tal, realizou-se dois ajustes: o primeiro para os valores de  $N$  iguais a 2, 3, 5, 8, 10,

e 13; e o segundo para  $N$  iguais a 13, 15, 18, 20, 25, e 30. As curvas ajustadas pelo modelo de lei de potência nos forneceu  $\beta = (0,22 \pm 0,10)$  e  $\beta = (0,37 \pm 0,16)$ , para os respectivos expoentes em cada ajuste.

Com base nos valores de beta obtidos, pode-se inferir que há uma relação não linear entre a densidade  $\rho$  e a média dos D-centroides. No primeiro ajuste, onde os valores de  $N$  foram menores, observou-se que  $\langle D \rangle \propto \rho^{0,22}$ , sugerindo que o aumento da densidade exerce um impacto relativamente pequeno no deslocamento médio dos D-centroides. Por outro lado, no segundo ajuste, realizado para valores maiores de  $N$ , encontrou-se  $\langle D \rangle \propto \rho^{0,37}$ , indicando que o aumento da densidade exerce um impacto mais significativo no deslocamento médio dos D-centroides. Este resultado sugere que o centro de massa dos grupos passam a se deslocar em regiões um pouco mais afastadas da parede, o que pode ser atribuído a uma maior preferência dos peixes por formar configurações mais dispersas ou por formarem agregados maiores, compostos por indivíduos que encontram-se correlacionados. É importante observar as distâncias em torno de 20 e 25cm, nas PDF da figura 4.11, que são raramente frequentadas pelos grupos. Apesar da variação crescente de  $N$ , eles ainda buscam regiões próximas às bordas do recipiente, que pode está relacionado ao comportamento de seguir a borda ("*edge-following*").

A mudança de comportamento observada no gráfico 4.12 também pode ser verificada através dos histogramas dos incrementos do D-centroide  $\delta D = [D(t + \delta t) - D(t)]$ , conforme ilustrado na figura 4.9, para os valores que se encontram nos extremos de  $N$  e o ponto de ligação entre os dois ajuste realizados, ou seja,  $N = 2, 13$  e 30. A partir das distribuições de  $\delta D$  apresentadas na figura 4.13, podemos observar uma tendência ao surgimento de caudas longas em  $N = 30$ . Para as correlações mencionadas, realizamos os ajustes da q-gaussiana, equação 4.3, para as  $\delta D$  da figura 4.13 e expressamos os ajustes resultantes na figura 4.14, onde as características de distribuição não-gaussiana se tornam mais evidentes, com o aparecimento das caudas longas e picos estreitos.

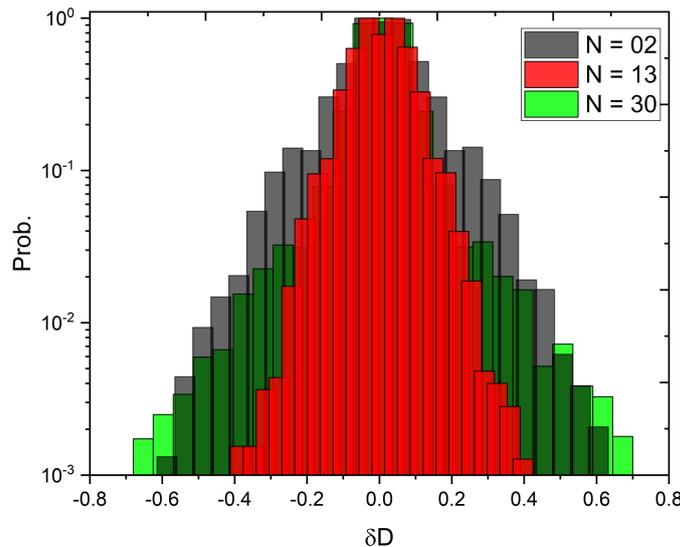


Figura 4.13: Histograma da  $\delta D$  para os grupos com  $N = 2$ ,  $N = 13$  e  $N = 30$ .

Através dos ajustes na  $\delta D$ , é possível verificar que, à medida que o número de indivíduos no grupo aumenta, as distribuições apresentam caudas mais longas, tendendo para uma distribuição não-gaussiana, como evidenciado na figura 4.14 e por meio dos valores do parâmetro  $q$  e do coeficiente de determinação  $R^2$  obtidos para cada ajuste, conforme mostrado na tabela 4.3.

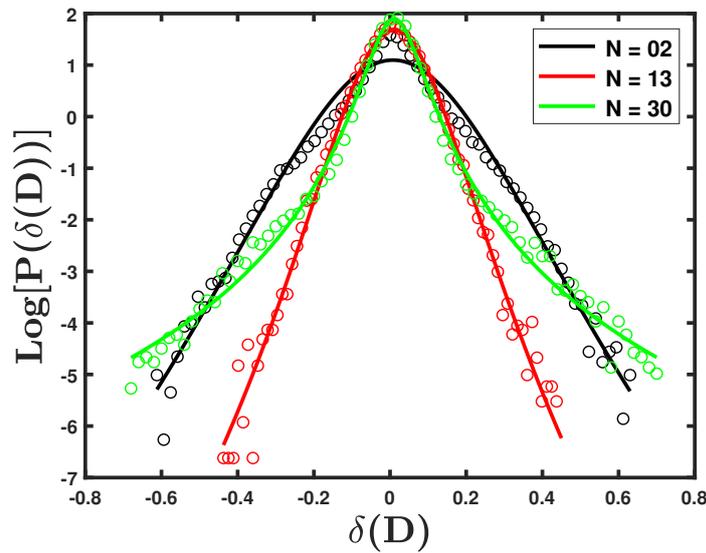


Figura 4.14: Gráfico das PDF do  $\delta D$  para  $N = 2$  (círculos pretos),  $N = 13$  (círculos vermelhos) e  $N = 30$  (círculos verdes). As linhas sólidas representam a  $q$ -gaussiana que melhor se ajusta aos pontos.

Como observado na figura 4.14, as PDF ajustadas pela  $q$ -gaussiana apresentam características semelhantes às agregações, caudas longas e picos estreitos se destacam conforme os valores de  $N$  crescem. Resultando em distribuições do tipo gaussianas para  $N$  menores e não-gaussiana para valores maiores de  $N$ . As caudas longas são causadas pela movimentação dos indivíduos cada vez mais próximos da região central do recipiente, se opondo ao comportamento preferencial de seguir a borda descrito anteriormente.

$N$	$q$	$R^2$
2	$1,19 \pm 0,08$	0,97
13	$1,21 \pm 0,06$	0,98
30	$1,68 \pm 0,08$	0,98

Tabela 4.3: Valores do parâmetro  $q$  obtidos por meio de ajustes da  $q$ -gaussiana com melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) atribuído às curvas sob os pontos experimentais dos incrementos do D-centroide para diferentes tamanhos de grupo de peixes ( $N$ ).

Os resultados apresentados nesta análise para as flutuações dos incrementos da polarização ( $\delta P$ ), agregação ( $\delta A$ ) e D-centroide ( $\delta D$ ) são mostrados na figura 4.15. É possível observar a relação dos valores de “ $q$ ” em relação ao número total de indivíduos  $N$ , indicando uma

tendência de diminuição do valor de “q” à medida que  $N$  aumenta, para a polarização. Para a agregação e o D-centroide, podemos observar um comportamento inverso, onde há um aumento dos valores de “q” à medida de  $N$  aumenta. O parâmetro “q” pode ser compreendido como um indicador indireto das correlações entre os indivíduos dos grupos, pois a medida em que “q” se aproxima de 1, a distribuição da função q-gaussiana tende a se assemelhar a uma distribuição gaussiana, onde a maioria dos dados tende a se concentrar na região central da curva, onde a correlação entre as variáveis é baixa. Nas figuras 4.6, 4.10 e 4.14, podemos observar que as séries temporais dos parâmetros analisados tendem a apresentar baixa correlação a medida que as distribuições q-gaussianas se aproximam de uma distribuição gaussiana.

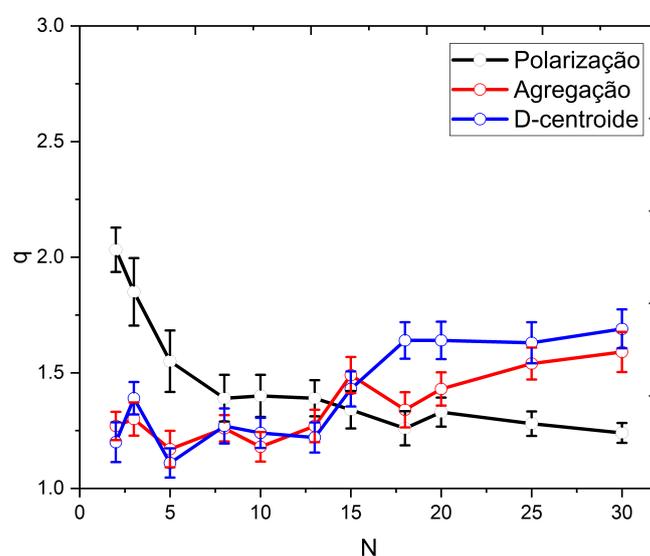


Figura 4.15: Gráfico dos valores de q das distribuições dos ajustes q-gaussiano em relação ao número de peixes  $N$ .

A análise do gráfico da figura 4.15, indica que há uma diminuição na correlação entre os indivíduos em relação à polarização à medida que o número de peixes no grupo aumenta. Grupos menores que correspondem ao comportamento de *school* apresentam maior correlação entre seus vizinhos, enquanto grupos maiores, que possuem características de *shoal*, apresentam menor correlação, o que pode ser usado para explicar o comportamento desordenado com baixa polarização e perda de sincronização observada nesses grupos. Diferentemente do que é observado na polarização, os comportamentos de agregação e D-centroide apresentam uma relação crescente entre o número de peixes e os valores de “q”. Os baixos valores de “q” para grupos pequenos de peixes, observados na figura 4.15, estão relacionados ao fato de que esses grupos tendem a apresentar um comportamento coordenado e sincronizado, onde esses grupos apresentam maior complexidade no comportamento de polarização entre os peixes. Isso significa que os indivíduos do grupo tendem a se mover juntos em uma direção comum o que leva a uma estabilidade maior do raio de agregação e do deslocamento do centro de massa que permanece

próximo à parede ao longo do tempo, resultando em um comportamento menos complexo desses parâmetros e maior correlação no parâmetro de polarização, onde o sistema apresenta maior complexidade para os grupos com características de *school*. No entanto, o aumento de “ $q$ ” com o crescente número de indivíduos para os parâmetros de agregação e D-centroide, ocorre devido a um aumento na frequência de interações entre os indivíduos do grupo, gerando o aumento de complexidade no comportamento de agregação e D-centroide. Com mais indivíduos no grupo, é mais difícil manter uma configuração compacta e sincronizada, afetando o deslocamento do centro de massa ao longo da borda e conseqüentemente as configurações de agregação adotadas pelos indivíduos, o que pode levar ao aumento das correlações no comportamento do raio de agregação e do D-centroide.

Na figura 4.15, também é possível notar um aumento no valor de “ $q$ ” para a análise do D-centroide a partir de um determinado valor de  $N$ , comportamento semelhante ao observado na agregação. Este fenômeno pode estar relacionado ao fato de que, quando o número de indivíduos em uma determinada área é muito alto em relação ao tamanho da região, o comportamento do D-centroide tende a se estabilizar da mesma forma que o raio de agregação.



## Conclusão

Nesta dissertação, apresentamos um estudo aprofundado sobre as propriedades comportamentais das partículas auto-propelidas (*self-propelled particles* - *SPP*'s) através da análise comportamental do peixe *Danio rerio*, baseados em estudos prévios na área. Utilizamos os parâmetros de ordem, especificamente a polarização, agregação e o D-centroide, para avaliar a presença de comportamentos emergentes e complexos decorrentes da interação entre indivíduos, os quais se manifestam como transições de fase à medida que a densidade de área  $\rho$ , varia com a mudança do número de indivíduos presentes em um ambiente finito sob condições controladas.

Com base nas análises realizadas neste trabalho, foi possível observar uma transição de fase significativa entre os comportamentos de *school* e *shoal* nos grupos de peixes investigados, ocorrendo em torno do valor de  $N = 13$ . Essa observação foi possível graças à relação estabelecida entre as leis de potência utilizadas para descrever a relação entre os valores médios dos parâmetros de interesse e a densidade  $\rho$ , usados para caracterizar a presença dos dois comportamentos mencionados. As transições entre os comportamentos de *school* e *shoal* foram definidas por meio de variações significativas no grau de alinhamento dos indivíduos, na distribuição espacial adotada e no deslocamento do centro de massa do grupo. Além disso, foi avaliada a variação da correlação decorrente da interação entre os peixes, analisada por meio das derivadas dos parâmetros utilizados.

A análise concomitante dos três parâmetros permite obter uma compreensão aprimorada sobre as alterações nos comportamentos dos grupos de peixes e na definição de *school* e *shoal*. Verificamos como os peixes confinados são impactados em sua estruturação ao serem submetidos a tais condições experimentais, resultando em diminuição da polarização, desorganização em grupos agregados, dispersão e perda de correlação entre os indivíduos em grupos maiores. Além disso, em diferentes experimentos com proporções variadas, é observado comportamentos diferentes dos obtidos com as configurações utilizadas neste trabalho. Portanto, ao analisar este comportamento, é essencial considerar a densidade do grupo, e não apenas a quantidade de indivíduos presentes, uma vez que a distribuição de tamanho dos grupos pode ser afetada pelas dimensões do ambiente em questão.

Os resultados obtidos ao longo desta dissertação representam contribuições significativas para os estudos de sistemas de não-equilíbrio a partir das análises estatísticas das trajetórias de peixes da espécie *Danio rerio*, com ênfase nas transições de fase entre comportamento *schools-shoals*, bem como a variação da correlação mediante os parâmetros utilizados para analisar o sistema com auxílio do parâmetro “q” da função q-gaussiana. Os resultados destacam a importância desses sistemas como modelos para compreender fenômenos complexos e fornecem percepções valiosas sobre o comportamento coletivo emergente. Além disso, os achados contribuem para o avanço do conhecimento em áreas como biologia, física e ciências interdisciplinares, ampliando nossa compreensão dos princípios subjacentes aos sistemas complexos e universais.

Embora os métodos de análise utilizados neste trabalho tenham sido eficazes, há espaço para aperfeiçoamento e aprofundamento em futuros estudos. Por exemplo, seria possível examinar de forma mais detalhada a influência dos vizinhos na formação das agregações ou investigar o papel da polarização, avaliando a tendência dos indivíduos em manter uma distância constante uns dos outros. Além disso, seria interessante explorar a aplicabilidade dos métodos utilizados para diferenciar o comportamento de indivíduos saudáveis, doentes ou que foram expostos a algum agente químico. Dessa forma, seria possível comparar essas características e utilizá-las para verificar a possível recuperação de um peixe doente, ampliando ainda mais a relevância e impacto dos resultados apresentados nesta dissertação.

Neste trabalho, além das análises e discussões realizadas, também foram conduzidas à parte, avaliações multifractais dos grupos de peixes estudados. Os resultados mostraram que os grupos apresentam características de sistemas multifractais. Adicionalmente, a análise evidenciou que houve uma transição dos sistemas multifractais para sistemas monofractais conforme o valor de  $N$  aumentava, estes resultados foram utilizados junto aos aqui discutidos, para elaboração de um trabalho que até um presente momento encontra-se em desenvolvimento.

## Referências Bibliográficas

- [1] AQUARISMO ONLINE. Paracheirodon axelrodi (Neon Cardinal). <https://www.aquaonline.com.br/peixes/doce/cardume/1622-paracheirodon-axelrodi-neon-cardinal>, acesso em 05 de fevereiro de 2023.
- [2] ARANSON, I. The aquatic dance of bacteria. *Physics* 6 (2013), 61.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10520*. Rio de Janeiro, ago. 2002.
- [4] ATTANASI, A., CAVAGNA, A., DEL CASTELLO, L., GIARDINA, I., GRIGERA, T. S., JELIĆ, A., MELILLO, S., PARISI, L., POHL, O., SHEN, E., ET AL. Superfluid transport of information in turning flocks of starlings. *arXiv preprint arXiv:1303.7097* (2013).
- [5] ATTANASI, A., CAVAGNA, A., DEL CASTELLO, L., GIARDINA, I., GRIGERA, T. S., JELIĆ, A., MELILLO, S., PARISI, L., POHL, O., SHEN, E., ET AL. Information transfer and behavioural inertia in starling flocks. *Nat. phys.* 10, 9 (2014), 691–696.
- [6] BÄR, M., GROSSMANN, R., HEIDENREICH, S., AND PERUANI, F. Self-propelled rods: Insights and perspectives for active matter. *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* 11 (2020), 441–466.
- [7] BAUSCH, A., AND KROY, K. A bottom-up approach to cell mechanics. *Nat. phys.* 2, 4 (2006), 231–238.
- [8] BECHINGER, C., DI LEONARDO, R., LÖWEN, H., REICHHARDT, C., VOLPE, G., AND VOLPE, G. Active particles in complex and crowded environments. *Rev. Mod. Phys.* 88, 4 (2016), 045006.
- [9] BOGOMOLOV, A., LEPRI, B., STAIANO, J., LETOUZÉ, E., OLIVER, N., PIANESI, F., AND PENTLAND, A. Moves on the street: Classifying crime hotspots using aggregated anonymized data on people dynamics. *Big data* 3, 3 (2015), 148–158.
- [10] BREDER JR, CHARLES M E HALPERN, F. Comportamento inato e adquirido afetando a agregação de peixes. *Zoologia fisiológica* 19, 2 (1946), 154–190.
- [11] CALOVI, D. S., LITCHINKO, A., LECHEVAL, V., LOPEZ, U., PÉREZ ESCUDERO, A., CHATÉ, H., SIRE, C., AND THERAULAZ, G. Disentangling and modeling interactions

- in fish with burst-and-coast swimming reveal distinct alignment and attraction behaviors. *PLoS Comput. Biol.* 14, 1 (2018), e1005933.
- [12] CALOVI, D. S., LOPEZ, U., NGO, S., SIRE, C., CHATÉ, H., AND THERAULAZ, G. Swarming, schooling, milling: phase diagram of a data-driven fish school model. *New J. Phys.* 16, 1 (2014), 015026.
- [13] CALOVI, D. S., LOPEZ, U., SCHUHMACHER, P., CHATÉ, H., SIRE, C., AND THERAULAZ, G. Collective response to perturbations in a data-driven fish school model. *J. R. Soc. Interface* 12, 104 (2015), 20141362.
- [14] CAMAZINE, S., DENEUBOURG, J.-L., FRANKS, N. R., SNEYD, J., THERAULA, G., AND BONABEAU, E. Self-organization in biological systems. In *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton university press, 2020.
- [15] CLARK, D. P., PAZDERNIK, N. J., AND MCGEHEE, M. R. Chapter 1 - cells and organisms. In *Molecular Biology (Third Edition)*, D. P. Clark, N. J. Pazdernik, and M. R. McGehee, Eds., third edition ed. Academic Cell, 2019, pp. 2–37.
- [16] COLEMAN, C. N., CLIFFER, K. D., DICARLO, A. L., HOMER, M. J., MOYER, B. R., LOELIUS, S. G., TEWELL, A. W., BADER, J. L., AND KOERNER, J. F. Preparedness for a ‘no-notice’ mass-casualty incident: a nuclear detonation scenario. *Int. J. Radiat. Biol.* 98, 5 (2022), 873–877.
- [17] COUZIN, I. D., KRAUSE, J., JAMES, R., RUXTON, G. D., AND FRANKS, N. R. Collective memory and spatial sorting in animal groups. *J. Theor. Biol.* 218, 1 (2002), 1–11.
- [18] CZAJKOWSKI, M. D. *Rheology and Collective Behavior in Living Tissue*. PhD thesis, Syracuse University, 2018.
- [19] D’ALOIA, C., BOGDANOWICZ, S., HARRISON, R., AND BUSTON, P. Seascape continuity plays an important role in determining patterns of spatial genetic structure in a coral reef fish. *Mol. Ecol.* 23, 12 (2014), 2902–2913.
- [20] DAMMSKI, A., MÜLLER, B., AND GAYA, C. *Manual de Criação em Biotério*. academia.edu, 2011.
- [21] DELCOURT, J., AND PONCIN, P. Shoals and schools: back to the heuristic definitions and quantitative references. *Rev. Fish Biol. Fish.* 22, 3 (2012), 595–619.
- [22] DO TRANSPORTE, D. Cptm bate recorde de passageiros, mas qualidade ainda não é a ideal, 2014.
- [23] ELGETI, J., AND GOMPPER, G. Self-propelled rods near surfaces. *Europhys. Lett.* 85, 3 (2009), 38002.

- [24] FACCIOL, A., IQBAL, M., EADA, A., TRAN, S., AND GERLAI, R. The light-dark task in zebrafish confuses two distinct factors: Interaction between background shade and illumination level preference. *Pharmacology Biochemistry and Behavior* 179 (2019), 9–21.
- [25] FARINE, D. R., STRANDBURG-PESHKIN, A., COUZIN, I. D., BERGER-WOLF, T. Y., AND CROFOOT, M. C. Individual variation in local interaction rules can explain emergent patterns of spatial organization in wild baboons. *Proc. Royal Soc. B* 284, 1853 (2017), 20162243.
- [26] FAUCHER, K., PARMENTIER, E., BECCO, C., VANDEWALLE, N., AND VANDEWALLE, P. Fish lateral system is required for accurate control of shoaling behaviour. *Anim. Behav.* 79, 3 (2010), 679–687.
- [27] FEAR, S. Publication quality tables in latex, 2005.
- [28] FEDER, J. *Fractals*. Springer Science & Business Media, 1988.
- [29] FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., AND SANDS, M. *Mechanik*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2015.
- [30] FLIERL, G., GRÜNBAUM, D., LEVINS, S., AND OLSON, D. From individuals to aggregations: the interplay between behavior and physics. *J. Theor. Biol.* 196, 4 (1999), 397–454.
- [31] GAUTRAIS, J., JOST, C., AND THERAULAZ, G. Key behavioural factors in a self-organised fish school model. In *Annales Zoologici Fennici* (2008), vol. 45, BioOne, pp. 415–428.
- [32] GLOBO. Aves migratórias se espalham pelo sertão nordestino. <https://globoplay.globo.com/v/3648756/>, março 2023. Acessado em 24 de março de 2023.
- [33] GRÉGOIRE, G., AND CHATÉ, H. Onset of collective and cohesive motion. *Phys Rev. Lett.* 92, 2 (2004), 025702.
- [34] GRÉGOIRE, G., CHATÉ, H., AND TU, Y. Moving and staying together without a leader. *Physica D* 181, 3-4 (2003), 157–170.
- [35] GRÜNBAUM, D., AND OKUBO, A. Modelling social animal aggregations. In *Frontiers in mathematical biology*. Springer, 1994, pp. 296–325.
- [36] HAKEN, H., AND HAKEN, H. An introduction: nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology. *Synergetics: Introduction and Advanced Topics* (2004), 1–387.
- [37] HANSEN, J., AND MCDONALD, I. Theory of simple liquids third edition, 2006.

- [38] HASON, M., AND BARTŮŇEK, P. Zebrafish models of cancer—new insights on modeling human cancer in a non-mammalian vertebrate. *Genes* 10, 11 (2019).
- [39] JOLLES, J. W., BOOGERT, N. J., SRIDHAR, V. H., COUZIN, I. D., AND MANICA, A. Consistent individual differences drive collective behavior and group functioning of schooling fish. *Curr. Biol.* 27, 18 (2017), 2862–2868.
- [40] JONNYSEK. Sete garças grandes voando no céu. fundo pássaros., 2011.
- [41] KINOUCI, O., AND COPELLI, M. Optimal dynamical range of excitable networks at criticality. *Nat. phys.* 2, 5 (2006), 348–351.
- [42] KUMAR, D. Sete garças grandes voando no céu. fundo pássaros., 2020.
- [43] LEI, L., ESCOBEDO, R., SIRE, C., AND THERAULAZ, G. Computational and robotic modeling reveal parsimonious combinations of interactions between individuals in schooling fish. *PLoS Comput. Biol.* 16, 3 (03 2020), 1–45.
- [44] LIU, Y., GAO, X., YI, D., JIANG, H., ZHAO, Y., XU, J., AND ZHANG, J. Investigating human travel patterns from an activity semantic flow perspective: a case study within the fifth ring road in beijing using taxi trajectory data. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 11, 2 (2022), 140.
- [45] LOEWE, B., AND SHENDRUK, T. N. Passive janus particles are self-propelled in active nematics. *New J. Phys.* 24, 1 (jan 2022), 012001.
- [46] MARCHETTI, M. C., JOANNY, J.-F., RAMASWAMY, S., LIVERPOOL, T. B., PROST, J., RAO, M., AND SIMHA, R. A. Hydrodynamics of soft active matter. *Rev. Mod. Phys.* 85, 3 (2013), 1143.
- [47] MATSUDA, A., AND SANNOMIYA, N. Computer simulation of fish behavior in relation to fishing gear. ii. computer simulation of fish behavior in relation to a trap model. *Fish. Sci.* 51, 1 (1985), 33–39.
- [48] MATUDA, AND SANNOMIYA. Computer simulation of fish behavior in relation to fishing gear. ii. computer simulation of fish behavior in relation to a trap model. *Fish. Sci.* 51, 1 (1985), 33–39.
- [49] MCELWEE, M., ZHAO, B., AND SOGA, K. Real-time analysis of city scale transportation networks in new orleans metropolitan area using an agent based model approach. In *MATEC Web of Conferences* (2019), vol. 271, EDP Sciences, p. 06007.
- [50] MCFARLAND, W. N., AND MOSS, S. A. Internal behavior in fish schools. *Science* 156, 3772 (1967), 260–262.
- [51] MILLER, N., AND GERLAI, R. From schooling to shoaling: patterns of collective motion in zebrafish (*danio rerio*). *PloS one* 7, 11 (2012), e48865.

- [52] MOREIRA, M. A. *A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula*. Editora Universidade de Brasília, 2006.
- [53] MUNOZ, M. A. Colloquium: Criticality and dynamical scaling in living systems. *Rev. Mod. Phys.* 90, 3 (2018), 031001.
- [54] NOVALES FLAMARIQUE, I. Swimming behaviour tunes fish polarization vision to double prey sighting distance. *Sci. Rep.* 9, 1 (2019), 1–8.
- [55] PARRISH, J. K., VISCIDO, S. V., AND GRUNBAUM, D. Self-organized fish schools: an examination of emergent properties. *Biol. Bull.* 202, 3 (2002), 296–305.
- [56] PÉREZ-ESCUADERO, A., VICENTE-PAGE, J., HINZ, R. C., ARGANDA, S., AND DE POLAVIEJA, G. G. idtracker: tracking individuals in a group by automatic identification of unmarked animals. *Nat. Methods* 11, 7 (2014), 743–748.
- [57] PERUANI, F., DEUTSCH, A., AND BÄR, M. Nonequilibrium clustering of self-propelled rods. *Phys Rev. E* 74, 3 (2006), 030904.
- [58] PITCHER, T., AND MAGURRAN, A. Shoal size, patch profitability and information exchange in foraging goldfish. *Anim. Behav.* 31, 2 (1983), 546–555.
- [59] PITCHER, T. J. Heuristic definitions of fish shoaling behaviour. *Anim. Behav.* (1983).
- [60] POEL, W., DANIELS, B. C., SOSNA, M. M., TWOMEY, C. R., LEBLANC, S. P., COUZIN, I. D., AND ROMANCZUK, P. Subcritical escape waves in schooling fish. *Sci. Adv.* 8, 25 (2022), eabm6385.
- [61] POPKIN, G. The physics of life. *Nature* 529, 7584 (2016), 16.
- [62] POTTS, JONATHAN R.; HILLEN, T., AND LEWIS, M. A. The “edge effect” phenomenon: deriving population abundance patterns from individual animal movement decisions. *Theor. Ecol.* 9 (2016), 233–247.
- [63] RAMASWAMY, S. Active matter. *J. Stat. Mech. Theory Exp.* 2017, 5 (2017), 054002.
- [64] REYNOLDS, C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1987), pp. 25–34.
- [65] RICHENDRER, H., PELKOWSKI, S., COLWILL, R., AND CRETON, R. On the edge: pharmacological evidence for anxiety-related behavior in zebrafish larvae. *Behav. Brain Res.* 228, 1 (2012), 99–106.
- [66] RIES, L., FLETCHER JR, R. J., BATTIN, J., AND SISK, T. D. Ecological responses to habitat edges: mechanisms, models, and variability explained. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35 (2004), 491–522.

- [67] ROSENTHAL, S. B., TWOMEY, C. R., HARTNETT, A. T., WU, H. S., AND COUZIN, I. D. Revealing the hidden networks of interaction in mobile animal groups allows prediction of complex behavioral contagion. *PNAS* 112, 15 (2015), 4690–4695.
- [68] SAMPAIO, C. Visualizando informações com um gráfico, 2011. Acessado em: 1 jun. 2011.
- [69] SANTER, M., NUNES, M. E. M., NUNES, F. V. M., LEANDRO, L. P., POSSER, T., AND FRANCO, J. L. Exposição embrionária de peixe-zebra à permetrina resulta em alterações neurocomportamentais na idade adulta. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão* 11, 2 (2019).
- [70] SARA EMEZI. Dslr vs webcam – which is better for streaming? Disponível em: <https://inevent.com/blog/tech-and-trends/dslr-vs-webcam.html>. Acesso em: 04 de outubro 2022, 2022.
- [71] SASKA, M. Mav-swarms: unmanned aerial vehicles stabilized along a given path using onboard relative localization. In *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (2015), IEEE, pp. 894–903.
- [72] SCHWEITZER, F., AND FARMER, J. D. *Brownian agents and active particles: collective dynamics in the natural and social sciences*, vol. 1. Springer, 2003.
- [73] SELA, A., AND BERGER, J. How attribute quantity influences option choice. *J. Mark. Res.* 49, 6 (2012), 942–953.
- [74] SMITH, T., HINDELL, J., JENKINS, G., AND CONNOLLY, R. Edge effects on fish associated with seagrass and sand patches. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 359 (05 2008).
- [75] SORIA, M., FRÉON, P., AND CHABANET, P. Schooling properties of an obligate and a facultative fish species. *J. Fish Biol.* 71, 5 (2007), 1257–1269.
- [76] STANLEY, H. E. *Phase transitions and critical phenomena*, vol. 7. Clarendon Press, Oxford, 1971.
- [77] STOTT, C., AND REICHER, S. *Mad mobs and Englishmen?: Myths and realities of the 2011 riots*. Hachette UK, 2011.
- [78] STRÖMBOM, D., AND TULEVECH, G. Attraction vs. alignment as drivers of collective motion. *Front. Appl. Math. Stat.* 7 (2022), 88.
- [79] SUGINO, R., MUSASHI, M., AND MORIZUMI, N. Chaos and fractal analysis of fish behavior in edge region. In *Proceedings of Electronics, Information and Systems Conference, Electronics, Information and Systems Society, IEE of Japan* (2009), pp. 931–934.
- [80] SUZUKI, K., TAKAGI, T., AND HIRAISHI, T. Video analysis of fish schooling behavior in finite space using a mathematical model. *Fish. Res.* 60, 1 (2003), 3–10.

- [81] TAKAGI, T., NASHIMOTO, K., YAMAMOTO, K., AND HIRAISHI, T. Fish schooling behavior in water tanks of different shapes and sizes. *Nipponuisan gakkaiishi* 59, 8 (1993), 1279–1287.
- [82] TAKAYOSHI, S., AOKI, H., AND OKA, T. Magnetization and phase transition induced by circularly polarized laser in quantum magnets. *Phys Rev. B* 90, 8 (2014), 085150.
- [83] TONER, J., AND TU, Y. Flocks, herds, and schools: A quantitative theory of flocking. *Phys Rev. E* 58, 4 (1998), 4828.
- [84] TSANG, B., AND GERLAI, R. Chapter 3 - breeding and larviculture of zebrafish (*danio rerio*). In *Laboratory Fish in Biomedical Research*, L. D'Angelo and P. de Girolamo, Eds. Academic Press, 2022, pp. 63–80.
- [85] TURCHIN, P. Population consequences of aggregative movement. *J. Anim. Ecol.* (1989), 75–100.
- [86] VICSEK, T., CZIRÓK, A., BEN-JACOB, E., COHEN, I., AND SHOCHET, O. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Phys Rev. Lett.* 75, 6 (1995), 1226.
- [87] VICSEK, T., AND ZAFEIRIS, A. Collective motion. *Physics reports* 517, 3-4 (2012), 71–140.
- [88] VILLAMIZAR, N., VERA, L. M., FOULKES, N. S., AND SÁNCHEZ-VÁZQUEZ, F. J. Effect of lighting conditions on zebrafish growth and development. *Zebrafish* 11, 2 (2014), 173–181. PMID: 24367902.
- [89] WALKER, J., RESNICK, R., AND HALLIDAY, D. *Halliday and resnick fundamentals of physics*. Wiley, 2014.
- [90] WANG, W., ESCOBEDO, R., SANCHEZ, S., SIRE, C., HAN, Z., AND THERAULAZ, G. The impact of individual perceptual and cognitive factors on collective states in a data-driven fish school model. *PLoS Comput. Biol.* 18, 3 (2022), e1009437.
- [91] WARD, A., AND WEBSTER, M. *Sociality: the behaviour of group-living animals*.
- [92] YATES, C. A., BAKER, R. E., ERBAN, R., AND MAINI, P. K. Refining self-propelled particle models for collective behaviour.



