



**PROPOSTA DE MODELO EVOLUCIONÁRIO PARA
SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CAMUFLAGEM EM SERES VIVOS**

LUIZ HENRIQUE MORAIS AGUIAR

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROPOSTA DE MODELO EVOLUCIONÁRIO PARA
SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CAMUFLAGEM EM SERES VIVOS

LUIZ HENRIQUE MORAIS AGUIAR

ORIENTADOR: ALEXANDRE ZAGHETTO
CO-ORIENTADOR: FLÁVIO DE BARROS VIDAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO ENM.DM – 109/16

Brasília, 06 de Setembro de 2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROPOSTA DE MODELO EVOLUCIONÁRIO PARA
SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CAMUFLAGEM EM SERES VIVOS**

LUIZ HENRIQUE MORAIS AGUIAR

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNI-
VERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Alexandre Zaghetto, Dr., CIC/UnB
(Orientador)**

**Prof. Flávio de Barros Vidal, Dr., CIC/UnB
Co-orientador**

**Prof. Carlos Humberto Llanos Quintero, Dr., ENM/UnB
Membro Interno**

**Prof.^a Célia Ghedini Ralha, PhD, CIC/UnB
Membro Externo**

BRASÍLIA, 06 DE SETEMBRO DE 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

AGUIAR, LUIZ HENRIQUE MORAIS
PROPOSTA DE MODELO EVOLUCIONÁRIO PARA SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CAMUFLAGEM EM SERES VIVOS [Distrito Federal] 2016.
xiv,78p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2016).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Mecânica

1. Computação Natural	2. Darwin
3. Inteligência Artificial	4. Evolução
I. ENM/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGUIAR, L. H. M. (2016). PROPOSTA DE MODELO EVOLUCIONÁRIO PARA SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CAMUFLAGEM EM SERES VIVOS, Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM109/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 78p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luiz Henrique Moraes Aguiar

TÍTULO: PROPOSTA DE MODELO EVOLUCIONÁRIO PARA SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CAMUFLAGEM EM SERES VIVOS.

GRAU: Mestre ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Luiz Henrique Moraes Aguiar
Departamento de Eng. Mecânica (ENM) - FT
Universidade de Brasília (UnB)
Campus Darcy Ribeiro
CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

*Aos meus pais Maria Stela Morais e
Mauricio Saraiva Aguiar. Sou grato
por me formarem com amor.*

AGRADECIMENTOS

*Ao professor **Alexandre Zaghetto** pela orientação e acompanhamento desde as primeiras ideias que hoje resultaram neste trabalho, uma das realizações que tenho mais orgulho e apreço. Agradeço por todos os conselhos, amizade e momentos alegres.*

*Ao professor **Flávio de Barros Vidal** que muito além de orientar, aconselha, se preocupa e está sempre disposto a trabalhar. Sou grato por me acompanhar por grande parte do desenvolvimento deste trabalho.*

*Ao amigo **Cauê Zaghetto**, pelas melhores aulas de estrutura de dados que alguém poderia ter, por acreditar em mim mais do que eu mesmo e sempre me motivar a crescer. Agradeço pelo carinho, lições de vida e bons momentos.*

*Ao **Mateus Mendelson Esteves da Silva** pelo companheirismo e ajuda na finalização deste trabalho.*

A minha família por me apoiarem durante toda a minha vida.

Por fim, a todos os amigos e pessoas que me ajudaram na realização deste trabalho desde o início do curso de mestrado.

RESUMO

PROPOSTA DE MODELO EVOLUCIONÁRIO PARA SIMULAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA CAMUFLAGEM EM SERES VIVOS

Autor: Luiz Henrique Morais Aguiar

Orientador: Prof. Alexandre Zaghetto, Dr., CIC/UnB

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília, Setembro de 2016

O presente trabalho propõe um modelo evolucionário para simulação da evolução da camuflagem em seres vivos virtuais na presença de seus predadores. Neste modelo contém gerente, ambiente, presas, predadores, recursos para as presas, recursos para os predadores e recursos compartilhados. Foram definidos seus atributos e comportamentos básicos incluindo as relações entre eles. A partir do modelo geral, duas aplicações específicas foram propostas: (a) o caso particular dos lebetes (*Pæcilia reticulata*) estudado por John A. Endler. Os predadores se alimentam dos lebetes que, por sua vez, se alimentam de outros recursos. Os três elementos do modelo (predador, lebeste e os recursos dos lebetes) estão inseridos no ambiente; e (b) um cenário fictício que simula um ambiente com espécies terrestres de presas e predadores, onde as presas representam uma espécie herbívora que possui plantas como recurso alimentar ao mesmo tempo que são recursos alimentares dos predadores. Além disso, há lagos que representam recursos compartilhados por ambas as espécies. Os atributos e comportamentos dos organismos simulados foram modelados a partir de pesquisa por observação. Um *software* computacional de simulação foi desenvolvido com base no modelo proposto com a finalidade de validá-lo. Os resultados obtidos a partir de simulações utilizando o *software* mostram que o modelo proposto atinge um nível satisfatório em relação ao trabalho biológico utilizado como referência. A ferramenta de simulação pode principalmente ser utilizada por pesquisadores que precisam trabalhar com diversas variáveis para compreensão de modelos complexos de interação entre presas e predadores, podendo auxiliar na tomada de decisão sobre problemas de conservação de espécies além de possuir um carácter didático, podendo ser utilizado para demonstrar e estudar o processo de evolução dos seres vivos pela seleção natural.

ABSTRACT

PROPOSAL OF EVOLUTIONARY MODEL FOR SIMULATION OF CAMOUFLAGE EVOLUTION IN LIVING BEINGS

Author: Luiz Henrique Morais Aguiar

Supervisor: Prof. Alexandre Zagheto, Dr., CIC/UnB

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

This paper proposes an evolutionary model for simulation of the evolution of camouflage in virtual living beings in presence of predators. In this model contains a manager, an environment, preys, predators, resources for preys, resources for predators and shared resources. Their basics attributes and behaviors were defined beyond the relations among them. From the general model, two specific applications have been proposed: (a) the particular case of guppies (*Poecilia reticulata*) studied by John A. Endler. The predators feed of guppies and they feed of other resources. The three elements of model (predator, guppy and resource of guppy) are inserted in the environment; and (b) a fictitious scenario that simulates an environment with terrestrial species of preys and predators, which preys represent an herbivorous specie that take plants as food resources and are food resources for predators. Furthermore, there are lakes that represent shared resources for both species. The simulated organism' attributes and behaviors were modeled from researches through observation. A computational software was developed based on proposed model in order to validate it. The results obtained by simulations using the software show that the proposed model reaches a satisfactory level in relation to the biological work used as reference. The simulation tool can mainly be used by researchers who need to work with several variables for understanding of complex interaction models between preys and predators to assist in decision-making on species conservation issues and it has a didactic character and can be used to demonstrate and study the process of evolution of living beings by natural selection as well.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	TEORIA DA EVOLUÇÃO DAS ESPÉCIES PELA SELEÇÃO NATURAL	4
2.1.1	PRINCÍPIOS GERAIS	4
2.1.2	CASO DE ESTUDO: O <i>pæcilia reticulata</i> E A EVOLUÇÃO DA CAMUFLAGEM	8
2.2	O MODELO PRESA-PREDADOR DE LOTKA-VOLTERRA	10
2.3	COMPUTAÇÃO NATURAL	14
2.3.1	COMPUTAÇÃO COM MATERIAIS NATURAIS	14
2.3.2	COMPUTAÇÃO INSPIRADA PELA NATUREZA	16
2.3.3	SIMULAÇÃO E EMULAÇÃO DA NATUREZA	20
3	SOLUÇÃO PROPOSTA	31
3.1	MODELO GERAL	31
3.1.1	GERENTE	32
3.1.2	AMBIENTE	33
3.1.3	RECURSOS	33
3.1.4	PRESAS E PREDADORES	33
3.2	APLICAÇÃO DO MODELO AO ESTUDO DOS LEBISTES	49
3.2.1	AMBIENTE	50
3.3	APLICAÇÃO DO MODELO A UM CENÁRIO FICTÍCIO	52
3.3.1	LAGOS	53
3.3.2	PLANTAS	54
3.4	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO	55
3.4.1	DEMIOURGOS: <i>software</i> DE SIMULAÇÃO	55
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	62
4.0.2	CLASSE DE EXPERIMENTO I	63
4.0.3	CLASSE DE EXPERIMENTO II	66
4.0.4	CLASSE DE EXPERIMENTO III	68
4.0.5	CLASSE DE EXPERIMENTO IV	70
4.0.6	CLASSE DE EXPERIMENTO V	72
4.0.7	CLASSE DE EXPERIMENTO VI	75

4.0.8 CLASSE DE EXPERIMENTO VII.....	77
4.0.9 CLASSE DE EXPERIMENTO VIII.....	79
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
APÊNDICE A ATRIBUTOS.....	92
A.1 ATRIBUTOS DO GERENTE.....	92
A.2 ATRIBUTOS DO AMBIENTE	92
A.3 ATRIBUTOS DOS LAGOS	93
A.4 ATRIBUTOS DOS PLANTAS.....	93
A.5 ATRIBUTOS DOS ORGANISMOS VIRTUAIS, PRESA E PREDADOR.....	94
APÊNDICE B FLUXOGRAMAS	95
B.1 SIGNIFICADO DAS FORMAS DOS FLUXOGRAMAS	95
B.2 FLUXOGRAMAS GERENTE.....	96
B.2.1 FLUXOGRAMA DO CICLO DE VIDA DO GERENTE.....	96
B.2.2 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Inicializa a simulação</i>	97
B.2.3 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Salva informações</i>	98
B.3 FLUXOGRAMAS PLANTAS	99
B.3.1 FLUXOGRAMA DO CICLO DE VIDA DAS PLANTAS	99
B.4 FLUXOGRAMAS PRESAS E PREDADORES	100
B.4.1 FLUXOGRAMA DO CICLO DE VIDA DOS ORGANISMOS PRESA E PRE- DADOR.....	100
B.4.2 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Verifica a camuflagem</i>	101
B.4.3 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Verifica a fertilidade</i>	102
B.4.4 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Verifica a fome</i>	103
B.4.5 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Verifica a sede</i>	104
B.4.6 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Se reproduzir</i>	105
B.4.7 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Transcorreu 1 segundo</i>	106
B.4.8 FLUXOGRAMA DO SUBPROCESSO <i>Atualiza a categoria</i>	107
APÊNDICE C TELAS DO SOFTWARE DE CONFIGURAÇÃO	108
C.1 TELA DE CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE	108
C.2 TELA DE CONFIGURAÇÃO DAS PRESAS E PREDADORES	109
C.3 TELA DE CONFIGURAÇÃO DAS PLANTAS	110
C.4 TELA DE CONFIGURAÇÃO DOS LAGOS.....	111
C.5 TELA DE INICIO DA SIMULAÇÃO	112
APÊNDICE D RESULTADOS EXPERIMENTAIS COMPLEMENTARES .	113
D.1 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO I.....	114

D.1.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO I.1.	114
D.1.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO I.3.	115
D.1.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO I.4.	116
D.2	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO II	117
D.2.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO II.2.	117
D.2.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO II.3.	118
D.2.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO I.4.	119
D.3	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO III	120
D.3.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO III.2.	120
D.3.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO III.3.	121
D.3.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO III.4.	122
D.4	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO IV	123
D.4.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO IV.1.	123
D.4.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO IV.2.	124
D.4.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO IV.3.	125
D.4.4	RESULTADOS DO EXPERIMENTO IV.4.	126
D.4.5	RESULTADOS DO EXPERIMENTO IV.5.	127
D.4.6	RESULTADOS DO EXPERIMENTO IV.6.	128
D.4.7	RESULTADOS DO EXPERIMENTO IV.8.	129
D.5	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO V	130
D.5.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO V.1.	130
D.5.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO V.2.	131
D.5.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO V.4.	132
D.5.4	RESULTADOS DO EXPERIMENTO V.5.	133
D.5.5	RESULTADOS DO EXPERIMENTO V.6.	134
D.5.6	RESULTADOS DO EXPERIMENTO V.7.	135
D.5.7	RESULTADOS DO EXPERIMENTO V.8.	136
D.6	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO VI	137
D.6.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VI.2.	137
D.6.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VI.3.	138
D.6.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VI.4.	139
D.7	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO VII	140
D.7.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VII.1.	140
D.7.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VII.2.	141
D.7.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VII.4.	142
D.8	CENÁRIO DE SIMULAÇÃO VIII	143
D.8.1	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VIII.2.	143
D.8.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VIII.3.	144
D.8.3	RESULTADOS DO EXPERIMENTO VIII.4.	145

LISTA DE FIGURAS

1.1	A estrutura dos ramos do conhecimento onde a solução proposta está situada. .	2
2.1	Ilustração do resultado da hereditariedade. Os dois indivíduos genitores geram um novo indivíduo que tem as características semelhantes às dos pais.....	5
2.2	Exemplo da aplicação da seleção natural.	6
2.3	Gráfico que representa a relação entre o crescimento populacional com a produção de recursos.	7
2.4	Um padrão do histórico de vida de um único organismo. O tempo passa ao longo do eixo horizontal, o qual está dividido em diferentes fases. O esforço reprodutivo está indicado no eixo vertical.	8
2.5	(a) A espécie <i>pæcilia reticulata</i> (lebiste); (b) a espécie <i>Crenicichla alta</i> (joaninha). Os peixes joaninhas são forte predadores dos lebistes.....	9
2.6	Exemplo de gráfico do crescimento e redução populacional de presas (eixo horizontal) e predadores (eixo vertical). Quando a população de presas é grande, a população de predadores é baixa e isso se inverte gradualmente.....	13
2.7	Exemplo de gráfico do crescimento e redução populacional de presas e predadores (eixo vertical) ao longo do tempo (eixo horizontal).	13
2.8	Ilustração de um fragmento de ADN. Os filamentos de cor verde são C (citossina). Os filamentos de cor lilás são G (guanina). Os filamentos de cor rosa são A (Adenina). Os filamentos de cor azul são T (timina).	16
2.9	Exemplos de aplicações no campo de Inteligência de Enxames. (a) Colônia de formigas; e (b) Enxame de partículas.	20
2.10	Exemplo de um fractal composto por bifurcações.	22
2.11	Ilustração do comportamento grupal dos indivíduos. (a) Separação e evasão de colisão; (b) Sentido e velocidade; e (c) Centralização ou coesão do grupo... ..	24
2.12	Exemplos da evolução de um <i>biomorph</i> no decorrer de gerações.	25
2.13	Exemplos de diferentes biomorphs.	25
2.14	Conjuntos de células em um tabuleiro de O jogo da vida. Os conjuntos à direita são gerações posteriores.	28
3.1	Modelo geral, composto por um gerente, um ambiente, presas, predadores, recursos para presas, recursos para predadores e recursos compartilhados.....	31
3.2	Relação entre os elementos constituintes do modelo geral.	32
3.3	Funções do gerente.	32
3.4	Estrutura do código de características de um organismo virtual. O código de características é um vetor que contém todas as características da presa ou predador.	34

3.5	Exemplo da divisão da vida dos organismos virtuais em categorias. É importante ressaltar que da forma com que está distribuído nesse exemplo, o período reprodutivo (<i>categorias</i> 2 e 3) das presas será maior, logo, elas terão maior probabilidade de se reproduzir.	35
3.6	Relação entre TE e o atributo <i>velocidade</i> para $FDM_x = 1$	37
3.7	Atributo <i>campo de visão</i> , limite dentro do qual o organismo virtual está apto a perceber elementos do ambiente.	37
3.8	O tamanho do <i>campo de visão de alimentação</i> varia entre o fator de redução (FR_{CVA}) e o valor máximo ($CV A_{máx}$) dependendo da <i>categoria</i> em que o organismo virtual se encontra. O marcador de cor vermelha representa o tamanho do <i>campo de visão de alimentação</i> sorteado aleatoriamente e sofre alteração quando o organismo virtual passa de <i>categoria</i>	38
3.9	Relação entre o tempo de vida de um organismo virtual (eixo horizontal) e o tamanho do <i>campo de visão de reprodução</i> (eixo vertical). O tamanho do <i>campo de visão de reprodução</i> é zero durante a <i>categoria</i> 1, crescente na <i>categoria</i> 2, decrescente na <i>categoria</i> 3 e zero na <i>categoria</i> 4.	39
3.10	Exemplos de presa camuflada e não camufladas.	40
3.11	A <i>posição</i> de um organismo é definida pela posição da célula central do círculo que representa graficamente um organismo no ambiente.	43
3.12	O <i>tamanho</i> de um indivíduo é a distância r entre sua posição (X, Y) e a borda do círculo que o representa graficamente.	44
3.13	Ilustração da escolha do <i>foco de deslocamento</i> (F) dentro da área de deslocamento (área cinza) definida pelos raios r e R que formam círculos concêntricos na posição do indivíduo.	45
3.14	Ilustração de 3 (três) iterações.	46
3.15	Exemplo de movimentação de um indivíduo (círculo vermelho) sem a presença de ameaças, parceiros ou alvos (utilizando o <i>movimento padrão</i>). No exemplo da figura, é possível observar o caminho que o indivíduo traçou aleatoriamente através da escolha de <i>focos de deslocamento</i> consecutivos.	46
3.16	Exemplo de um organismo virtual ao identificar, em seu campo de visão, outro indivíduo do <i>sexo</i> oposto.	47
3.17	Exemplo da detecção de alvos no <i>campo de visão de alimentação</i> dos organismos: (a) predador se aproxima de uma presa quando está com fome e a identifica dentro dos limites do seu <i>campo de visão de alimentação</i> ; e (b) presa se aproxima de um recurso estático quando está com fome e o identifica dentro de seu <i>campo de visão de alimentação</i>	47
3.18	Exemplo de uma presa fugindo de um predador ao identificá-lo em seu <i>campo de visão de alimentação</i>	48
3.19	Estrutura da <i>fome</i> de um organismo virtual, que pode assumir valores entre 0 e $Fome_{máx}$. Os <i>tempos de fome e saciedade</i> somados são iguais a $Fome_{máx}$	49

3.20	Elementos do sistema presa-predador que envolve os lebistes.....	50
3.21	Relação entre os elementos constituintes do modelo lebiste.	50
3.22	Células do ambiente de simulação	51
3.23	Um componente da cor (R , G ou B) varia dentro de um intervalo (intervalo de variação) que é calculado a partir dos valores dos atributos <i>cor mínima</i> e <i>cor máxima</i> ao redor do valor da <i>cor inicial</i> do ambiente.	51
3.24	Exemplo de mudança de <i>cor</i> do ambiente que possui uma <i>cor inicial</i> = 125. Um componente da <i>cor</i> (R , G ou B) se aproxima da <i>cor alvo</i> a intervalos de cor (IMA) a cada período de tempo PMA . O processo se repete para os três componentes.	52
3.25	Elementos do sistema presa-predador fictício. As plantas são recursos para presas, as presas são recursos para predadores e os lagos são recursos compartilhados para presas e predadores.....	52
3.26	Relação entre os elementos constituintes do cenário fictício.....	53
3.27	Exemplo da função senoidal que modela a oscilação de um lago.	54
3.28	Um arquivo de configuração contém parâmetros de entrada do <i>software</i> simulador.....	56
3.29	Processo de configuração dos parâmetros das simulações.....	56
3.30	Processo de geração de relatório da simulação.....	57
3.31	Funções do gerente. Os retângulos de cor amarela são funções executadas durante a simulação e os retângulos de cor azul são funções executadas na inicialização da simulação.....	58
3.32	Uma matriz de <i>pixels</i>	60
3.33	Representação gráfica da variação do volume de um lago ao longo do tempo. .	60
3.34	Representação visual das plantas na simulação.	61
3.35	Representação visual das presas e predadores.....	61
4.1	Resultados do experimento I.2.	65
4.2	Resultados do experimento II.1.	67
4.3	Resultados do experimento III.1.	69
4.4	Resultados do experimento IV.7.	71
4.5	Resultados do experimento V.3.	74
4.6	Resultados do experimento VI.1.	76
4.7	Resultados do experimento VII.3.	78
4.8	Resultados do experimento VIII.1.....	80

LISTA DE TABELAS

2.1	Tabela de comparação entre as propostas apresentadas sobre Vida Artificial....	30
3.1	Categorias das presas e predadores.....	35
3.2	Atributos da <i>idade</i>	36
3.3	Valores da <i>velocidade</i> por categoria.....	36
3.4	Porcentagem do <i>campo de visão de alimentação</i> por categoria.	39
3.5	Atributos da <i>mutação</i>	41
3.6	Atributos da <i>doença</i>	42
3.7	Parâmetros do <i>sexo</i>	43
3.8	Atributos da <i>necessidade de recursos</i>	49
3.9	Atributos dos lagos.....	54
3.10	Atributos das plantas.....	55
3.11	Informações de simulação que são armazenadas nos relatórios.....	58
4.1	Tabela com módulos habilitados em cada classe de experimento	62
4.2	Parâmetros variáveis para cada experimento.....	63
4.3	Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe I.	64
4.4	Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe II.	66
4.5	Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe III.	68
4.6	Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe IV.	70
4.7	Tempo de extinção em segundos dos predadores das classes IV e V.....	72
4.8	Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe V.	73
4.9	Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe VI.	75
4.10	Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe VII.	77
4.11	Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe VIII.....	79
A.1	Parâmetros de entrada da simulação referentes ao gerente, armazenados no arquivo de configuração.....	92
A.2	Parâmetros de entrada da simulação referentes ao ambiente, armazenados no arquivo de configuração.....	92
A.3	Parâmetros de entrada da simulação referentes aos lagos, armazenados no arquivo de configuração.....	93
A.4	Parâmetros de entrada da simulação referentes às plantas, armazenados no arquivo de configuração.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>RGB</i>	Red Green Blue
<i>IA</i>	Inteligência Artificial
<i>ADN</i>	Ácido Desoxirribonucleico
<i>AG</i>	Algoritmo Genético
<i>RNA</i>	Rede Neural Artificial
<i>AE</i>	Algoritmo Evolucionário
<i>AG</i>	Algoritmo Genético
<i>EE</i>	Estratégias Evolutivas
<i>PE</i>	Programação Evolucionária

1 INTRODUÇÃO

O conjunto de características que permite a um organismo permanecer indistinto do ambiente em que vive chama-se camuflagem e pode ocorrer pela cor, forma ou tipo de cobertura do organismo [1]. O desenvolvimento da camuflagem tem por objetivo principal garantir a sobrevivência em um ambiente repleto de predadores. No livro “O Maior Espetáculo da Terra”, o cientista Richard Dawkins [2] exemplifica a evolução da camuflagem, apresentando uma pesquisa de John A. Endler a respeito de lebetes (*Poecilia reticulata*) [3], um peixe de água doce popularmente criado em aquários. Endler verificou que populações desse tipo de peixe apresentam colorações diferentes dependendo das características do fundo do rio onde vivem e da presença em maior ou menor quantidade de predadores no ambiente.

Em sua obra “A Origem das Espécies”, Charles Darwin [4] descreve como os seres vivos podem evoluir a partir da adaptação pela seleção natural, processo que permite aos mais bem-adaptados sobreviverem e passarem adiante suas características [5]. Tomando-se como ponto de partida a teoria proposta por Charles Darwin, o presente trabalho tem por objetivo modelar o processo de evolução da camuflagem de organismos na presença de seus predadores, semelhante ao que foi observado por John A. Endler, em sua pesquisa com lebetes, além de implementar um simulador para validar o modelo.

A partir do modelo específico desenvolvido para o caso dos lebetes, foi proposto um modelo geral, mais abrangente, e por fim tal modelo foi aplicado a um outro caso particular, fictício, que extrapola o estudo de caso dos lebetes.

A solução proposta está situada no ramo da Vida Artificial, uma categoria da Simulação e Emulação de Fenômenos Naturais em Computadores da Computação Natural que é uma sub-área da Inteligência Artificial (IA), conforme representado na Figura 1.1.

Para validar o modelo proposto, foi implementada uma ferramenta de simulação em linguagem de programação C++, que pode ser utilizada por pesquisadores que precisam trabalhar com múltiplas variáveis ajustáveis para estudar modelos complexos de interação entre os seres vivos. A ferramenta pode auxiliar os pesquisadores na compreensão da própria Teoria da Evolução das Espécies pela Seleção Natural de Darwin, e na avaliação de situações atuais e projeções futuras, auxiliando no processo de tomada de decisão sobre problemas de conservação de espécies. O simulador pode ser utilizado por professores de biologia em aulas sobre a Teoria da Evolução das Espécies pela Seleção Natural, o que lhe atribui também um caráter didático. Apesar de não ser o foco deste trabalho, vislumbra-se sua utilização na resolução de problemas não necessariamente relacionados à evolução das espécies.

Os resultados experimentais confirmam o que foi observado por John A. Endler em sua pesquisa com os lebetes. Além disso, a extrapolação do estudo de casos dos lebetes a um cenário fictício por meio do modelo geral proposto mostrou-se bem sucedida. Em ambos os casos, a evolução da camuflagem foi observada.

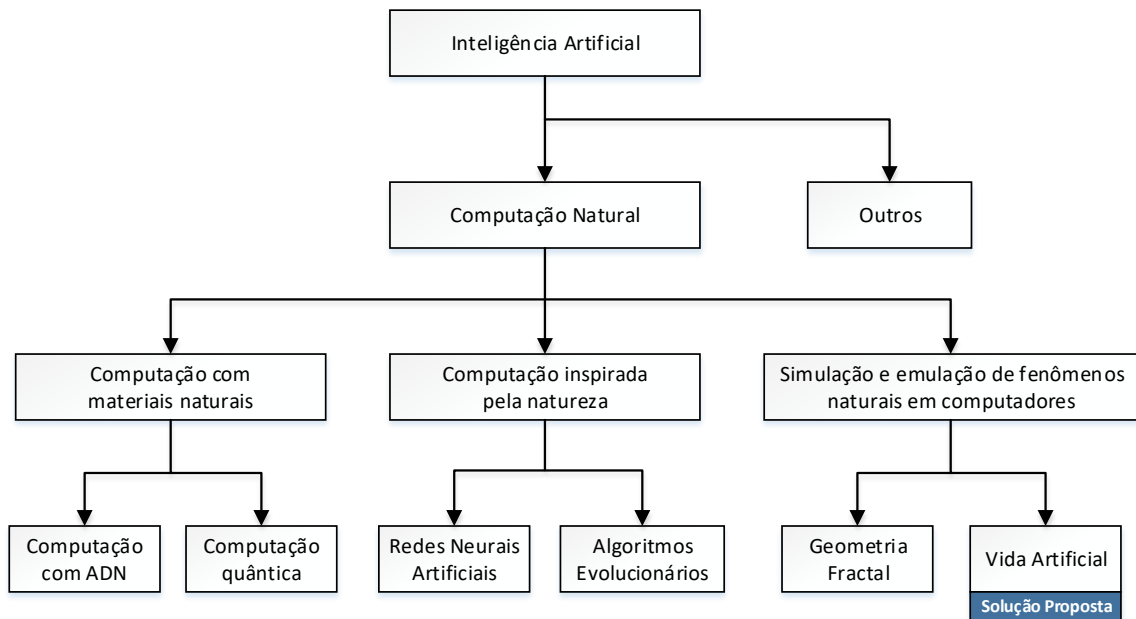


Figura 1.1: A estrutura dos ramos do conhecimento onde a solução proposta está situada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Propor um modelo computacional baseado em computação natural capaz de descrever adequadamente o processo de evolução da camuflagem de seres vivos virtuais em um sistema presa-predador com base na Teoria da Evolução das Espécies pela Seleção Natural de Charles Darwin.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Estudar o experimento realizado por John A. Endler [3] a respeito da espécie *Pæcilia reticulata* com ênfase na evolução de sua camuflagem;
- Identificar as principais características e comportamentos que definem a interação entre presas (*Pæcilia reticulata*) e predadores, dentro do contexto estudado por Endler, utilizando-o como um estudo de caso;
- Propor um modelo geral a partir do estudo de caso da evolução da camuflagem na espécie *Pæcilia reticulata*;
- Aplicar o modelo geral a um cenário fictício que extrapola o que foi observado no caso da espécie *Pæcilia reticulata*;
- Implementar um simulador em linguagem C++; e
- Realizar experimentos para validar o modelo proposto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada da seguinte maneira: no Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos necessários ao entendimento do modelo proposto. Dentre os temas abordados estão: Teoria da Evolução das Espécies pela Seleção Natural, o modelo presa-predador de Lotka-Volterra e Computação Natural. No Capítulo 3 é apresentada a solução proposta, descrevendo as características e os comportamentos que constituem o modelo, bem como o software de simulação Demiourgos desenvolvido a partir do modelo proposto. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nas simulações geradas pelo simulador, que utiliza diversas configurações de ambientes e populações. Apresentam-se no Capítulo 5 as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e conteúdos necessários para elaboração deste trabalho os quais fornecem subsídio para o desenvolvimento da metodologia proposta (Capítulo 3).

Na Seção 2.1 será apresentada uma visão geral da teoria da evolução das espécies pela seleção natural concebida por Charles R. Darwin, com ênfase nas características e comportamentos das espécies em geral, incluindo a espécie *pæcilia reticulata* em um sistema presa-predador, o qual motivou o desenvolvimento deste trabalho. Na Seção 2.2, serão apresentados o modelo presa-predador de Lotka-Volterra, conceitos, exemplos e aplicações da computação natural.

2.1 TEORIA DA EVOLUÇÃO DAS ESPÉCIES PELA SELEÇÃO NATURAL

A teoria da evolução das espécies foi concebida por Charles R. Darwin, um naturalista britânico [6], apresentada e discutida em sua principal obra [5]. Em tal teoria, a evolução das espécies se dá por meio da seleção natural, onde os seres vivos mais bem adaptados às condições em que vivem sobrevivem e transmitem suas características genéticas para seus descendentes. Na Seção 2.1.1 serão apresentados os princípios gerais da teoria da evolução.

2.1.1 Princípios Gerais

Uma das principais características das espécies é a capacidade de adaptação que se dá por meio de variações apresentadas em organismos individuais. As espécies de animais e plantas são variáveis devido à diferentes condições de vida [5]. Algumas variações causam efeitos significativos que influenciam a sobrevivência dos indivíduos. Se as variações beneficiarem a sobrevivência, elas têm maior probabilidade de serem difundidas a outros indivíduos ao longo das gerações, o que possibilita a evolução [7]. Contudo, existem também variações que não são úteis, tampouco prejudiciais para a sobrevivência da espécie. Estas não são levadas em consideração, pois não influenciam a seleção natural, podendo ser pouco difundidas na espécie ou se tornarem fixas devido a natureza dos organismos ou das condições em que os organismos vivem [5].

A evolução, em seu sentido mais amplo, não significa necessariamente progresso, mas corresponde a mudança [8]. A evolução é a mudança nas propriedades das populações dos organismos, que transcendem o período de vida de um único organismo. Dessa forma, as mudanças evolutivas acontecem no nível populacional e são transmitidas através de material genético, de uma geração para outra, através da característica da hereditariedade como pode

ser exemplificado na Figura 2.1. Não obstante, os indivíduos de uma espécie se desenvolvem desde o nascimento até a morte e, durante esse período, passam por mudanças. Contudo, isso não é considerado evolução.

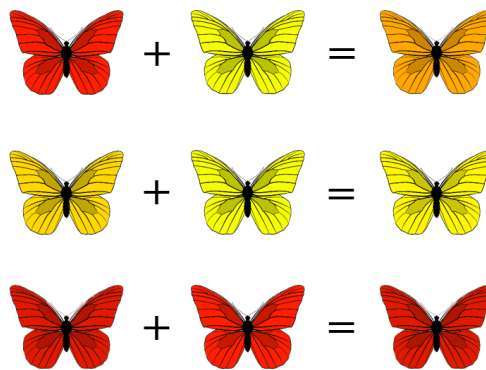


Figura 2.1: Ilustração do resultado da hereditariedade. Os dois indivíduos genitores geram um novo indivíduo que tem as características semelhantes às dos pais.

Essas variações são responsáveis pela diversidade genética que é a variedade presente nos organismos num grupo, por exemplo, populações, espécies ou grupos de espécies. Ela é expressa em muitas características dos indivíduos. Sem diversidade genética, os organismos não têm como se adaptar às mudanças do ambiente, ou seja, evoluir [8].

As mudanças no ambiente são fatores abióticos, que podem ser mudanças na temperatura, umidade, pH (potencial hidrogeniônico) e salinidade [8]. As diferentes condições ambientais causam a oscilação da abundância de espécies, motivo pelo qual há alta densidade de populações de certas espécies em alguns lugares e baixa em outros [7].

Além dos fatores ambientais, os seres vivos também estão suscetíveis a fatores bióticos [5], que são condições de vida diferentes devido a relação entre os seres da mesma espécie e de outras espécies diferentes.

Sendo esses fatores (bióticos e abióticos) mutáveis, novas habilidades tornam-se necessárias para o favorecimento e preservação de espécimes. Dessa forma, as habilidades já dominadas tornam-se supérfluas visto que não são mais úteis à situação atual da espécie [5].

Essa adaptação necessária das espécies a sua atual condição de vida é dada através de pequenas diferenças individuais, que são manifestadas em seres únicos e os tornam diferentes dos demais de sua espécie, beneficiando-os ou não [5]. A existência dessas diferenças individuais tem grande importância na atuação da seleção natural, visto que se for uma mudança individual que favoreça a sobrevivência dos indivíduos, muito provavelmente se tornará hereditária, difundindo essa característica entre as gerações futuras.

O princípio pelo qual cada pequena variação, se for útil, é preservada é denominado seleção natural [5]. Em algumas espécies, a seleção natural atua modificando os dois sexos em relação a hábitos de vida diferentes, mas é mais provável que um dos sexos seja modificado por influência do outro no passar das gerações [5]. A Figura 2.2 ilustra o processo de evolução de uma espécie através da seleção natural.

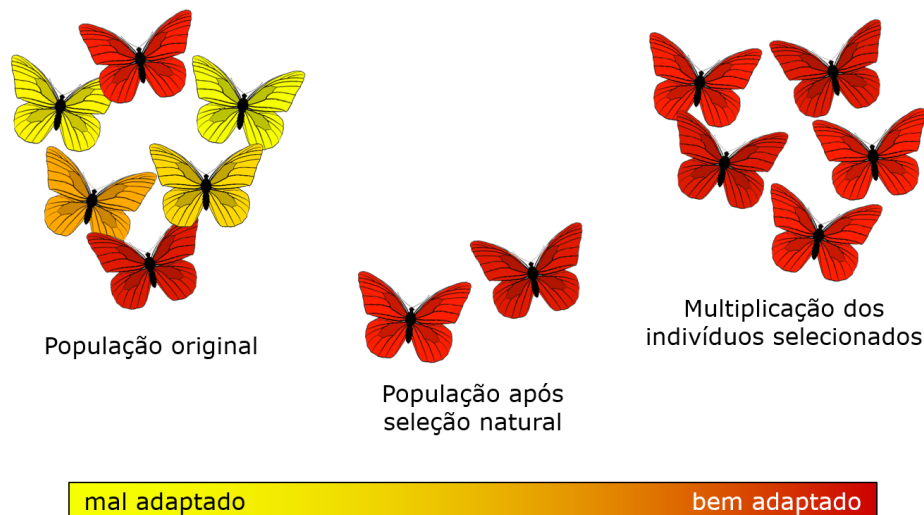


Figura 2.2: Exemplo da aplicação da seleção natural.

Em um ambiente em que a seleção natural teve grande atuação, ou seja, as espécies estão bem adaptadas, que é a situação mais comum, é inevitável a luta pela existência porque por mais que uma espécie esteja adaptada, possivelmente haverá uma ou mais espécies distintas em situação semelhante, aumentando a concorrência, além da disputa existente entre os indivíduos de mesma espécie. A disputa é causada porque os indivíduos têm objetivos em comum, não apenas de sobreviver, mas também obter êxito em deixar descendentes [5].

Um dos fatores de maior disputa entre os seres vivos são os recursos [9]. Os recursos são todas as coisas consumidas por um organismo. Não apenas alimentos, mas também território e insumos utilizados na proteção e na reprodução e que tenha característica de não estar disponível para outros organismos, o que causa maior competição entre os seres. O conflito intraespecífico, ou seja, entre os membros da mesma espécie é quase sempre muito mais acirrado, por frequentarem os mesmos territórios, procurarem o mesmo alimento e estarem expostos aos mesmos perigos [5].

A luta pela existência é a consequência inevitável do elevado crescimento da população ao longo do tempo [5]. Cada ser, durante seu ciclo natural de vida, sofre destruição durante algum período de sua vida. Isso é necessário, pois, caso contrário, o número de indivíduos tornar-se-ia logo de tal grandeza que não haveria nenhuma região capaz de suportar tamanha produção, pelo princípio da progressão geométrica. Portanto, como são produzidos mais indivíduos do que os que têm possibilidade de sobreviver, há luta pela existência.

Um dos fatores limitantes do aumento populacional desordenado é a escassez de recursos [5]. A relação entre o crescimento populacional e os recursos é apresentada e discutida em [10]. A taxa de crescimento da população dos seres é exorbitante comparada com a produção de alimento.

De acordo com [10], o crescimento da população ocorre numa progressão geométrica, que é indefinidamente maior do que a produção natural de alimentos, que cresce numa progressão aritmética. É possível observar essa relação na Figura 2.3.

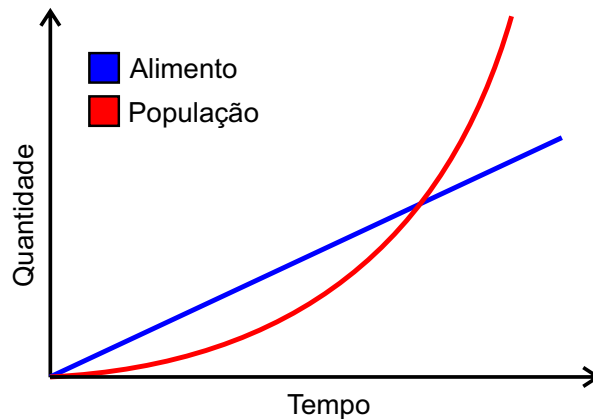


Figura 2.3: Gráfico que representa a relação entre o crescimento populacional com a produção de recursos.

Os animais em geral têm por instinto prolongar a espécie. Então, a vontade de crescer existe, como foi mencionada, mas é restringida pela falta de espaço, alimento e pelo fato de se tornarem presas de outros seres vivos, o que estabiliza a relação entre os seres e seu sustento [5, 10, 11].

As espécies que têm um habitat considerável, que são as mais espalhadas dentro do ambiente em que vivem e as que detêm o maior número de indivíduos são as espécies florescentes ou espécies dominantes, que produzem as variedades mais acentuadas [5].

Na disputa entre as espécies, a prevalência de alguma por vantagens desconhecidas a faz, conforme o passar do tempo, a espécie dominante no ambiente em que habita. Isso aumentará a competitividade entre os indivíduos da espécie dominante. Em contrapartida, será benéfico aos seus descendentes, pois quanto mais acirrada é a luta pela vida, mais provável é o desenvolvimento de características que auxiliam a sobrevivência deles e dos indivíduos das gerações futuras, superando as espécies raras que se desenvolvem com mais lentidão [5].

Se um indivíduo for propício a sobreviver, haverá um ponto crucial na vida dele e de qualquer organismo quando ele começa a se reproduzir e, assim, a gerar novos seres perpetuando a espécie [7]. A parte da vida do organismo na qual ele está apto a se reproduzir é denominada como período reprodutivo.

O ciclo de vida de um organismo pode ser dividido de maneira simplificada em 3 (três) períodos [7]:

- Período pré-reprodutivo - entre o nascimento e o início da fase reprodutiva;
- Período reprodutivo - entre o início e o término da fase reprodutiva; e
- Período pós-reprodutivo - entre o término da fase reprodutiva e a morte do organismo, como resultado da senescência.

O histórico da vida de todos os organismos pode ser vista como variações a cerca do

simples padrão apresentado na Figura 2.4 [7]. Para todos os organismos, antes de iniciar a reprodução existe um período de crescimento, que geralmente reduz de intensidade (ou cessa completamente) quando a reprodução se inicia [7].

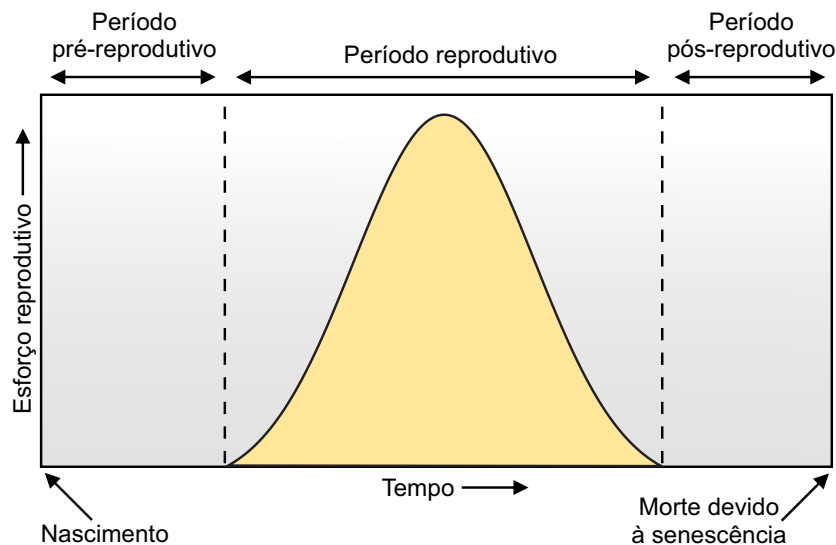


Figura 2.4: Um padrão do histórico de vida de um único organismo. O tempo passa ao longo do eixo horizontal, o qual está dividido em diferentes fases. O esforço reprodutivo está indicado no eixo vertical.

A fase da vida de crescimento é denominada período pré-reprodutivo. Quando o indivíduo está apto à reprodução e sobrevivência mais independente por conta do desenvolvimento das características físicas, passa para a fase reprodutiva. Quando a estrutura física do organismo já está desgastada pelo tempo e não consegue mais se reproduzir, ele se encontra no período pós-reprodutivo (fase senil) e está próximo da morte. Embora, naturalmente, outras formas de mortalidade (e.g. por predação) podem intervir nesse processo de ciclo da vida a qualquer momento [7].

Na luta das espécies contra a predação, algumas desenvolvem características que as beneficiam por meio da seleção natural, como foi dito anteriormente. Uma dessas características é a camuflagem, que será explorada na Seção 2.1.2.

2.1.2 Caso de Estudo: o *pæcilia reticulata* e a Evolução da Camuflagem

Nesta seção, será explorado um caso de estudo que envolve a espécie *pæcilia reticulata*. Nele, serão exploradas mudanças nas colorações dos indivíduos.

Os padrões de coloração em animais têm 3 (três) propósitos principais: termorregulação, comunicação intraespecífica (homotípicas) e evasão de predadores [12]. O tom de coloração afeta o equilíbrio térmico em algumas espécies (e.g., lagartos, borboletas e caracóis terrestres [13, 14, 15, 16]). Assumindo que a termorregulação está ajustada, a cor e o padrão são utilizados por muitas espécies durante o reconhecimento de parceiros e outros contextos so-

ciais, incluindo a detecção e evasão de predadores. Nesse sentido, o padrão de coloração de uma dada espécie está sujeito à seleção natural no que diz respeito à fuga de predadores e ao acasalamento.

Os padrões de coloração são utilizados no reconhecimento das espécies, eles devem ser mais distintos e destacados possíveis para que os indivíduos possam ser identificados e se reproduzam com facilidade [12]. Contudo, da mesma forma que os indivíduos são facilmente detectados por parceiros com o objetivo de copular, eles são detectados por possíveis predadores e correm mais risco de serem predados. Por outro lado, se o padrão for de carácter oculto, então há um conflito direto com a necessidade de comunicação intraespecífica. Algumas espécies com colorações ocultas desenvolveram outros meios para troca de informações [17], mas muitas ainda dependem de indícios visuais.

Os indivíduos têm o desafio de manter uma comunicação visual eficiente com os parceiros da mesma espécie e ao mesmo tempo serem imperceptíveis visualmente a predadores, ou seja, quando os indivíduos estão sob a condição de serem detectados de maneira intraespecífica mas não entre espécies. Essa característica é devido às diferenças entre as visões das presas e dos predadores, com a influência dos padrões apresentados pelo ambiente em que estão inseridas [12].

John A. Endler, um etologista e biólogo evolucionário, percebeu a aplicabilidade da seleção natural à espécie *pæcilia reticulata* (popularmente conhecida como lebiste, *guppy* ou barrigudinho) e realizou estudos e experimentos com o objetivo de observar a evolução no padrão de cores dos indivíduos dessa espécie [3].

Os lebistes são uma espécie de peixe herbívoro de água-doce também criado em aquários, famosa por apresentar padrões de colorações variáveis de acordo com o ambiente em que vivem e pelo potencial de predação a que eles são submetidos [3]. Os lebistes são nativos dos riachos da floresta montanhosa da costa nordeste da Venezuela, Margarita, Trinidad e Tobago [12, 18] (Figura 2.5 (a)). Endler notou que as populações locais se diferenciavam notavelmente umas das outras, em relação ao seu revestimento. Alguns possuíam cores vistosas e outros, cores mais pardacentas. E mostrou que isso se dava pela intensidade da predação em cada rio.

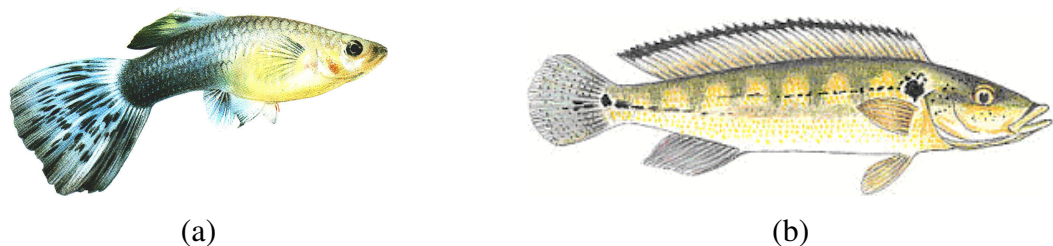


Figura 2.5: (a) A espécie *pæcilia reticulata* (lebiste); (b) a espécie *Crenicichla alta* (joaninha). Os peixes joaninhas são forte predadores dos lebistes.

Um dos experimentos mais relevantes realizados por John A. Endler [2, 3] consistiu em coletar lebistes selvagens com características de revestimento distintas, colocá-los em tanques com fundos seixosos ou arenosos e sob níveis de predação diferentes. Endler constatou que, depois de apenas 5 (cinco) meses de experimento, os lebistes (presa) evoluíram no que tange a tornarem-se mais semelhantes com o fundo dos tanques em que havia um grande nível de predação, devido à presença da espécie *Crenicichla alta*, popularmente conhecida como jacundá ou peixe joaninha (Figura 2.5 (b)). Endler observou também que em tanques em que a predação era ausente ou fraca, os peixes não evoluíram a fim de que seus padrões de coloração se parecessem com o fundo, mas se destacaram do fundo com o objetivo de serem mais vistosos e atraentes para seus parceiros sexuais [19, 20].

Numerosos outros experimentos que confirmam a significância adaptativa de seres vivos foram realizados [16, 21, 22, 23, 24]. Tendo em vista os experimentos realizados que relacionam o crescimento populacional de presas e predadores, utilizando a taxa de predação, as características do ambiente e outros fatores, alguns sistemas computacionais foram desenvolvidos utilizando o modelo de Lotka-Volterra, apresentado na Seção 2.2.

2.2 O MODELO PRESA-PREDADOR DE LOTKA-VOLTERRA

Como pôde ser visto na Seção 2.1, os seres vivos competem entre si e a coexistência é resultante dessa interação interespecífica. No entanto, existem também relações de cooperação entre espécies (relações harmônicas ou positivas) em que os indivíduos de espécies distintas contribuem para a existência de ambas [7, 25]. Como exemplo de relações harmônicas, podem-se citar:

- Mutualismo - as espécies dependem da relação e benefícios uma da outra para existirem;
- Protocooperação - ambas as espécies se beneficiam neste tipo de relação, contudo uma não depende da outra para sobreviver;
- Inquilinismo - uma espécie inquilina utiliza outra hospedeira como forma de abrigo. Essa relação não causa prejuízo a nenhuma das espécies envolvidas, apenas ganho à espécie inquilina; e
- Comensalismo - relação em que uma espécie se beneficia dos restos alimentares de outra sem causar prejuízo à nenhuma delas.

Por outro lado, existem também as relações desarmônicas (ou negativas) [25], são elas:

- Competição interespecífica - competição entre duas espécies distintas que compartilham o mesmo ambiente e recursos oriundos dele;

- Parasitismo - uma espécie parasita associa-se a outra hospedeira tirando proveito dela e causando, dessa forma, prejuízo à espécie hospedeira;
- Predatismo - relação em que uma espécie predadora mata e se alimenta de outra espécie presa;
- Herbivoria - relação semelhante ao predatismo, contudo a espécie predadora é um animal herbívoro e a espécie presa é uma planta; e
- Amensalismo - relação em que a reprodução ou crescimento populacional de uma espécie é prejudicada por outra.

Em suma, relações harmônicas resultam no benefício de pelo menos uma das espécies envolvidas, sem que outra espécie seja prejudicada, e as relações desarmônicas resultam no dano de uma espécie para o benefício de outra.

Nas relações desarmônicas, quando uma espécie se sobressai à outra, sua população cresce e, conseqüentemente, a população da espécie prejudicada é reduzida. Dessa forma, mais especificamente nas relações de predatismo, o recurso alimentar (presas) torna-se escasso e de difícil localização, logo, os predadores começam a morrer por falta de alimento (inanição). Com a população de predadores reduzida, o crescimento da população das presas torna-se mais favorável. Dessa forma, ambas espécies coexistem, sendo que, em determinado momento, uma prevalece em relação à outra, alternando-se. É importante frisar essa característica, pois é o caso de estudo do presente trabalho e pode ser observado nas simulações no Capítulo 4.

A relação de crescimento populacional de duas espécies envolvidas por um vínculo de predatismo é representada matematicamente pelo modelo de Lotka-Volterra [26, 27]. O químico americano Alfred Lotka e o matemático italiano Vito Volterra propuseram um conjunto de equações que modelam a dinâmica de populações em competição que levou o nome dos dois, Lotka-Volterra.

Apesar do fato de que nenhum modelo de dinâmica de populações é capaz de considerar a grande diversidade e complexidade dos seres vivos, o estudo restrito do comportamento das espécies é significativo [28]. A dinâmica de populações foi estudada previamente, a partir de pontos de vista distintos, mas que influenciaram o desenvolvimento do modelo de Lotka-Volterra. Dentre os trabalhos mais relevantes, podem-se citar: (a) Fibonacci, que apresenta o problema da reprodução de coelhos [29]; (b) Leonhard Euler, que apresenta um estudo sobre taxas de natalidade e mortalidade de populações humanas [30]; (c) Thomas Malthus, que apresenta um modelo de crescimento populacional em contraste ao crescimento de recursos [10] (mais detalhado na Seção 2.1); e (d) Pierre François Verhulst, que apresenta um estudo sobre um processo autolimitante que restringe o crescimento ilimitado de indivíduos [31, 32].

A Equação 2.1 modela o crescimento populacional de uma espécie (α) quando não há a influência de outra [27], em função da taxa de natalidade n e mortalidade m com população de p indivíduos variando com o tempo t .

$$\frac{dp_\alpha}{dt} = n_\alpha p_\alpha - m_\alpha p_\alpha = p_\alpha(n_\alpha - m_\alpha), p_\alpha > 0 \quad (2.1)$$

Entretanto, com a inclusão de uma espécie β que possui uma relação de predação sobre a espécie α , ocorre a competição entre elas. E isso faz com que p_α seja inversamente proporcional a p_β . Dessa forma, quando há predação, a população de presas sofre redução: $-p_\alpha p_\beta r_\alpha$, onde r_α é a taxa de redução da população de presas e, conseqüentemente, a população de predadores tem um crescimento: $p_\alpha p_\beta c_\beta$, onde c_β é a taxa de crescimento da população da espécie β .

A relação de crescimento populacional de uma espécie em relação à redução da outra pode ser observado na Equação 2.2 [27]:

$$\begin{aligned} \frac{dp_\alpha}{dt} &= p_\alpha(c_\alpha - r_\alpha p_\beta) \\ \frac{dp_\beta}{dt} &= p_\beta(c_\beta p_\alpha - r_\beta), \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde,

- c_α é a taxa de crescimento da população α ;
- c_β é a taxa de crescimento da população β ;
- r_α é a taxa de redução da população α ; e
- r_β é a taxa de redução da população β .

As Figuras 2.6 e 2.7 mostram o caso particular da solução da Equação 2.2.

O modelo Lotka-Volterra é uma das soluções do modelo presa-predador que representa o equilíbrio entre as populações de presa e predador. Depois de sua concepção, alguns estudos e aplicações computacionais foram desenvolvidos com base nesse modelo. O modelo proposto nessa dissertação pode apresentar um comportamento semelhante ao de Lotka-Volterra, contudo não utiliza a equação apresentada por se tratar de um sistema especialista.

Na Seção 2.3 serão apresentados conceitos relacionados à computação natural e alguns trabalhos correlatos.



Figura 2.6: Exemplo de gráfico do crescimento e redução populacional de presas (eixo horizontal) e predadores (eixo vertical). Quando a população de presas é grande, a população de predadores é baixa e isso se inverte gradualmente.

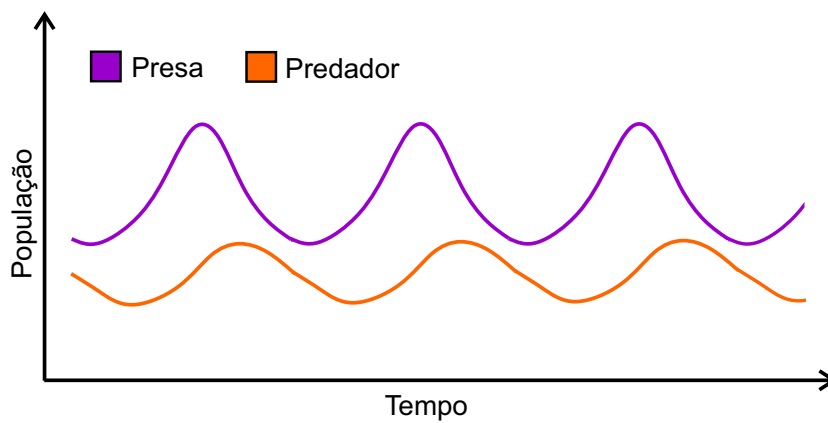


Figura 2.7: Exemplo de gráfico do crescimento e redução populacional de presas e predadores (eixo vertical) ao longo do tempo (eixo horizontal).

2.3 COMPUTAÇÃO NATURAL

Com o advento dos computadores, a natureza tem sido utilizada de formas não tradicionais, servindo de inspiração para modelos e técnicas para resolução de problemas complexos reais. A natureza agora está sendo usada como uma fonte de inspiração ou metáfora para o desenvolvimento de novas técnicas para resolver problemas complexos em vários domínios. Os computadores podem simular e emular processos de vida biológicos [11].

A computação natural pode ser considerada uma subdisciplina de Inteligência Artificial (IA), sendo a aplicação computacional do processo de extrair ideias da natureza para desenvolver sistemas "artificiais" (computacionais), ou usando meios naturais (e.g., moléculas) para realizar computação [11].

A computação natural [11] é o termo genérico utilizado para designar três tipos de abordagens que constituem a computação (Figura 1.1):

1. Computação com materiais naturais- esse ramo corresponde ao uso de materiais naturais para realizar computação, constituindo dessa forma um novo paradigma computacional que vem a substituir ou complementar os atuais computadores compostos por silício [11];
2. Computação inspirada pela natureza - a natureza é usada como inspiração para o desenvolvimento de técnicas de resolução de problemas complexos. A ideia principal deste ramo é desenvolver ferramentas computacionais (algoritmos) através da inspiração proveniente da natureza para a solução de problemas complexos [11] (e.g. algoritmos genéticos, redes neurais); e
3. A simulação e emulação de fenômenos naturais em computadores - consiste na simulação em computadores de padrões, formas, comportamentos e organismos que se assemelham à vida natural. Os resultados deste ramo da computação natural podem ser utilizados para imitar diversos fenômenos naturais e, deste modo, aumentar nosso entendimento a respeito da natureza, bem como propor modelos computacionais cuja aplicação extrapolam a simulação pura e simplesmente [11].

O presente trabalho está situado no terceiro ramo da computação natural (simulação e emulação de fenômenos naturais em computadores) uma vez que simula o comportamento de seres virtuais inspirado por observações e experimentos realizados por John A. Endler [3] em sua pesquisa com os lebetes.

2.3.1 Computação com materiais naturais

Esse ramo da computação natural sugere a utilização de recursos naturais para realizar computação. Materiais naturais como, por exemplo, moléculas e ADN (ácido desoxirribonu-

cleico), têm sido utilizadas para armazenamento de informações e se mostrado muito rápidos e econômicos no que tange à energia e ao armazenamento [11].

Computação com ADN

O ADN (ADN, ácido desoxirribonucleico; ou DNA, *deoxyribonucleic acid*) é um aglomerado de ligações dos nucleotídeos Adenina, Citosina, Timina e Guanina (representados pelas letras A, C, T e G) em cadeia e são capazes de armazenar informações genéticas [33]. Um fragmento de ADN é ilustrado na Figura 2.8.

Para armazenar todas as informações genéticas de um ser vivo, é preciso um grande número de ligações. As sequências de ADN são utilizadas na geração de novos seres vivos. O material genético é interpretado e combinado com o do parceiro que constitui as informações genéticas do novo indivíduo.

A computação com ADN faz parte de um campo mais amplo chamado computação molecular que pode ser amplamente definida como a utilização de moléculas e operações biomoleculares para realizar computação [11]. A computação molecular constitui uma combinação única entre Ciência da Computação e Biologia Molecular.

A computação com ADN pode ser vista como uma nova abordagem para resolução de problemas complexos ou como um novo paradigma computacional que eventualmente poderá complementar os computadores [33]. Para que isso se torne aplicável, são necessários alguns requisitos. Um deles, relacionado à potencialidade da computação com ADN, é a capacidade dessa nova abordagem de ser aplicada a qualquer problema computacional, ou seja, se qualquer algoritmo pode ser simulado por meio de computação com ADN. Outro requisito, que diz respeito à viabilidade de implementação física, é a dificuldade de construir um computador molecular.

Dentre as vantagens que a computação com ADN pode apresentar, podem-se citar: forma adaptada de lidar com paralelismo, alta eficiência energética e armazenamento de informações econômico, eficiência em resolver problemas de complexidade NP (tempo polinomial não determinístico) [34].

Computação Quântica

A computação quântica é a aplicação da mecânica quântica à Ciência da Computação de forma a construir computadores quânticos [35] que, por sua vez, se diferenciam dos computadores tradicionais baseados na arquitetura de Von Neuman [36, 37, 38]. Os computadores tradicionais trabalham com a informação armazenada e composta por *bits* que podem assumir os valores $|0\rangle$ ou $|1\rangle$. Contudo as informações são representadas em forma de bits

²https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DNA_simple.svg

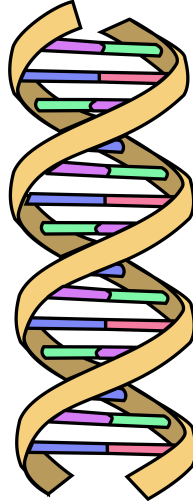


Figura 2.8: Ilustração de um fragmento de ADN². Os filamentos de cor verde são C (Citosina). Os filamentos de cor lilás são G (Guanina). Os filamentos de cor rosa são A (adenina). Os filamentos de cor azul são T (Timina).

quânticos (*quantum bits*, ou *qubits*) em computadores quânticos. Os *qubits* podem assumir os valores 0 ou 1, assim como os *bits*, mas também uma combinação de estados, chamada de superposição [35, 39]. A Equação 2.3 representa a superposição de dois valores γ e ρ que resulta no estado ϕ .

$$|\phi\rangle = \gamma|1\rangle + \rho|0\rangle \quad (2.3)$$

A computação quântica e a informação quântica tiveram contribuições de ideias fundamentais de outros campos (Mecânica Quântica, ciência da Computação, Teoria da Informação e Criptografia), a fim de desenvolver um novo paradigma computacional que possibilita a resolução de problemas específicos que não são possíveis para computadores tradicionais [40].

Dentre as vantagens apresentadas por computadores quânticos, destaca-se que eles podem ser usados para tratar de problemas utilizando-se princípios da mecânica quântica, tais como a localização dos fatores primos de um número grande, problema do logaritmo discreto, criptografia e problemas de Inteligência Artificial complexos [35, 41, 42, 43].

2.3.2 Computação Inspirada pela Natureza

Muitos problemas complexos têm boas soluções inspiradas pelo comportamento da natureza. Isso enriquece a computação oferecendo novas abordagens para resolver problemas. Em um nível baixo, existe uma motivação para sobrevivência de organismos vivos devido ao alto nível de complexidade de estratégias e estruturas envolvido [11].

Nas subseções 2.3.2, 2.3.2 e 2.3.2 serão apresentados redes neurais artificiais, algoritmos evolucionários e inteligência de enxames como subáreas de computação inspirada pela natureza.

Redes Neurais Artificiais

As redes neurais biológicas são formadas por um conjunto de neurônios interligados que recebem, processam e enviam sinais para outros neurônios. As Redes Neurais Artificiais (RNA) são um paradigma computacional inspirado em redes neurais biológicas que consiste no processamento realizado por neurônios matemáticos e pela interligação entre eles. Os neurônios têm diferentes pesos e são agrupados em camadas. A quantidade de neurônios em cada camada da rede, tal como os pesos de cada um, devem ser ajustados para cada situação específica [44, 45].

Uma RNA tradicional possui uma camada de entrada de dados, n camadas de processamento (composta por neurônios) e uma camada de saída [44, 45, 46].

As redes neurais artificiais podem ser classificadas em dois grupos, de acordo com os padrões de conexão entre os neurônios [45], são eles:

- Redes sem realimentação (*feed-forward networks*): o processamento da rede e a propagação de impulsos é feita em uma única direção, da camada de entrada até a camada de saída, camada a camada;
- Redes com realimentação ou recorrentes (*feedback networks* ou *recurrent networks*): a saída dos neurônios podem ser entradas para neurônios da mesma camada ou de camadas anteriores.

Algoritmos Evolucionários

Algoritmos Evolucionários (AEs) são programas de computador que tentam resolver problemas complexos mimetizando os processos da evolução Darwiniana [47]. Algoritmos Evolucionários são um paradigma computacional classificado em algoritmos de busca e otimização diretas e probabilísticas adquiridos da modelagem da evolução orgânica [48, 49]. Os Algoritmos Evolucionários utilizam de criaturas artificiais para realizar buscas a fim de encontrar a melhor solução [47].

As criaturas artificiais nos AEs são normalmente representadas por vetores ou cadeias de tamanhos fixos, também conhecidos como indivíduos que são uma possível solução para o problema [47]. Um conjunto de indivíduos é denominado população. Os AEs são inicializados com uma população inicial contendo indivíduos aleatórios. A população então é selecionada por uma pontuação de aptidão (*fitness*). Os indivíduos selecionados geram outros indivíduos, formando uma nova população cujos indivíduos também serão avaliados

por suas pontuações de aptidão e continuarão gerando novos indivíduos até que uma solução ótima para o problema seja encontrada.

As principais instâncias dos AEs foram desenvolvidas de maneira independente e se resumem em: Algoritmos Genéticos (AGs); Estratégias Evolutivas (EEs); e Programação Evolucionária (PE) [48, 50].

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são algoritmos de busca baseados nas características da seleção natural e genética natural [51, 52, 53]. O processo de busca se dá por estados sucessores que são gerados através da combinação de dois estados pais [46].

Os termos mais importantes utilizados em AGs são [44]:

- Gene - unidade que controla uma propriedade de um indivíduo;
- Cromossomo - conjunto de genes que representa um indivíduo. Um indivíduo é uma possível solução de um problema no espaço de soluções;
- População - conjunto de indivíduos;
- Operação de cruzamento - cruzamento de cromossomos para a geração de outros;
- Mutação - mudança aleatória de um gene em um cromossomo;
- Função de aptidão - critério que avalia cada indivíduo; e
- Seleção - procedimento que escolhe parte da população para continuar o processo de busca pela melhor solução.

Um Algoritmo Genético simples consiste no procedimento:

ALGORITMO-GENÉTICO

```
1  INICIALIZA() // Inicializa aleatoriamente a população de possíveis soluções.
2  while critério de término não é atingido
3       $i = \text{CRUZAR}(m\tilde{a}e, pai)$  // Cruza dois indivíduos para gerar um novo indivíduo.
4       $i = \text{MUTAR}(i)$  // Raramente o indivíduo sofre mutação.
5       $p = p + i$ 
6      SELECIONAR( $p$ ) // Seleciona os indivíduos mais promissores da população
           // de acordo com a função de aptidão.
```

Muitos problemas complexos de otimização encontram uma solução utilizando Algoritmos Genéticos [44]. Dentre eles, pode-se citar o Problema do Caixeiro Viajante [54, 55, 56, 57], *Min Cut Problem* [58, 59], otimização de arquiteturas de redes neurais [60, 61, 62, 63], encontrar regras *Fuzzy* e funções membros para os valores *Fuzzy* [64, 65, 66, 67, 68].

Os principais problemas para se utilizar AGs são a escolha das operações genéticas (cruzamento, seleção, mutação) e a escolha do critério de seleção [44]. Parâmetros importantes a definir em um algoritmo genético incluem:

- Esquema de codificação: como codificar o problema (escolher os genes, construir os cromossomos);
- Tamanho da população: quantidade de cromossomos (indivíduos);
- Operações de cruzamento: como combinar os cromossomos; e
- Heurística de mutação: com que frequência e como aplicar.

Ainda dentro de AEs, as EEs consistem em técnicas para a otimização de parâmetros que são uma alternativa para os Algoritmos Genéticos [47, 50, 69].

As estratégias são utilizadas para controlar o comportamento dos operadores de mutação [69]. De maneira semelhante aos algoritmos evolucionários, o procedimento para a realização das EEs também possuem uma população inicial aleatória e através da geração de indivíduos, atinge um objetivo ótimo. Contudo, as EEs contam também com parâmetros que auxiliam a escolha de melhores indivíduos.

A PE também é uma instância de AEs que tem o objetivo de utilizar os conceitos de evolução para desenvolver IA através da evolução de máquinas de estado finitos (MEF), que representam os indivíduos [70]. Nesta abordagem de AE, a reprodução se dá de maneira assexuada, cada indivíduo da população gera um descendente. Os descendentes competem com os genitores e apenas os que possuírem maior pontuação de aptidão (*fitness*) continuarão a gerar descendentes. O processo de evolução utiliza apenas o operador de mutação para gerar a variabilidade dos indivíduos [71, 72].

Inteligência de Enxames

Uma grande diversidade de espécies utilizam-se dos benefícios da sociabilidade como facilitador da sobrevivência [11]. Viver em grupo pode aumentar as chances de acasalamento, reduzir a probabilidade de ataques de predadores e a divisão de tarefas, além de facilitar a caça, por exemplo. Os comportamentos sociais têm servido de inspiração para o desenvolvimento de várias ferramentas computacionais a fim de resolver problemas [73, 74].

Inteligência de enxames é qualquer tentativa de desenvolver algoritmos ou dispositivos de resolução de problemas distribuídos inspirados pelo comportamento coletivo de colônias de insetos e outras sociedades de animais [75].

Dois algoritmos podem ser citados como exemplos do campo de inteligência de enxames. O primeiro deles é chamado de colônia de formigas (*Ant Colony*) utilizado principalmente para encontrar caminhos de menor custo. Neste exemplo, um grupo de formigas virtuais

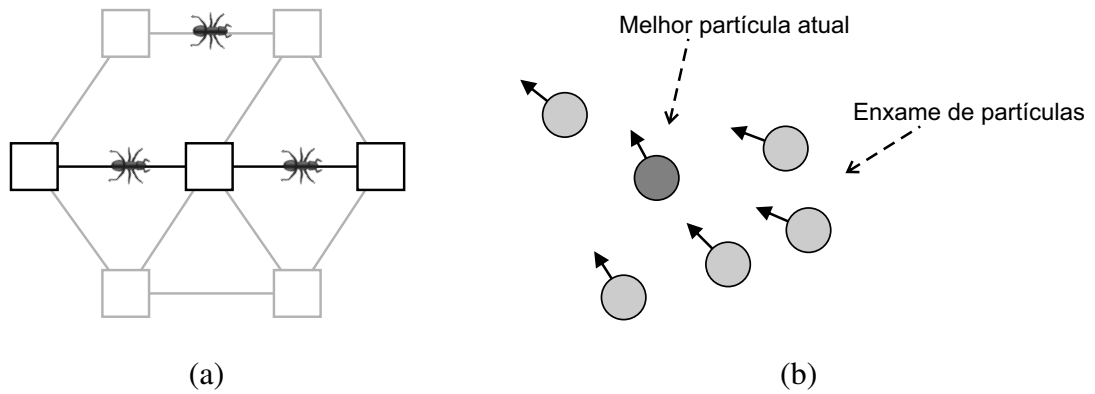


Figura 2.9: Exemplos de aplicações no campo de Inteligência de Enxames. (a) Colônia de formigas; e (b) Enxame de partículas.

tem o objetivo de chegar a um ponto com o menor custo possível. As formigas deixam feromônio (substância química) por onde passam, isso sugere, mas não determina, o caminho que outras formigas deverão seguir. A quantidade de feromônio será maior em caminhos onde as formigas passam com mais frequência. Com o tempo, o caminho das formigas é fixado pela grande quantidade de feromônio depositado [72, 76, 77].

O segundo exemplo é o enxame de partículas (*Particle Swarm*). Este algoritmo simula um grupo de partículas que se movimentam em conjunto guiadas por uma partícula líder que fica no centro do enxame. As partículas ao redor da líder tem o objetivo de encontrar melhores soluções resolvendo problemas principalmente de otimização [72, 75].

Na Seção 2.3.3 será apresentado o terceiro ramo da Computação Natural, a simulação e emulação de fenômenos naturais em computadores.

2.3.3 Simulação e Emulação da Natureza

Esse ramo da computação natural disponibiliza novas ferramentas para sintetizar e estudar os fenômenos naturais que podem ser utilizados para testar teorias biológicas que não podem ser testadas por meios de experimentos tradicionais, a fim de observar e conhecer padrões e comportamentos naturais [11].

Basicamente existem duas abordagens principais para a simulação e emulação da natureza em computadores [11]: utilizando ferramentas para estudo da geometria fractal da natureza ou utilizando técnicas de vida artificial, conforme pode ser observado na Figura 1.1. As duas principais abordagens do ramo da computação natural focadas em simulação e emulação da natureza serão descritas na Seção 2.3.3.

Geometria Fractal

Um grande avanço na modelagem e síntese dos padrões naturais e estruturas é o reconhecimento que a natureza é fractal no sentido que pode ser emulada por geometria fractal sem problemas [11]. Em geral, fractais são caracterizados por detalhes infinitos, comprimento infinito, auto similaridade, dimensões fractais, e a falta de suavidade ou derivada.

A geometria fractal tem a característica de representar modelos de estruturas e processos naturais com mais realismo do que geometria euclidiana clássica [11, 78]. A geometria fractal popularizou-se por renderizações complexas de terrenos por meio de computação gráfica e expandiu pesquisas em diversas disciplinas científicas [79].

A essência da geometria fractal é a indução utilizando construções geométricas simples a fim de transformar objetos iniciais. Os objetos fractais oriundos desse processo frequentemente se assemelham a fenômenos naturais [79].

A geometria fractal é uma extensão da geometria euclidiana clássica que modela aproximadamente as estruturas reais, mas que normalmente é satisfatória [78]. Contudo, existem processos que não são bem comportados como os da geometria euclidiana, mas que ainda assim precisam ser descritos [79]. Eles podem ser modelados adequadamente dentro de uma certa proximidade da escala, uma vez que nenhum modelo pode completamente descrever um objeto natural, pois a natureza não segue a regras artificiais impostas por modelos.

A geometria fractal pode ser usada para fazer modelos precisos de estruturas físicas em escalas variadas visto que uma de suas características é ser reproduzida em várias escalas o que facilita a implementação computacional da geometria fractal [78, 80, 81]. Um exemplo de geometria fractal pode ser visto na Figura 2.10.

De qualquer forma, a geometria fractal é infinita e o ambiente computacional finito, logo, o modelo fractal deve ser limitado a certa escala a fim de ser implementado em computadores [79].

Existem duas abordagens para o estudo da geometria fractal filiada a computação gráfica [79]:

- A que considera o computador como uma ferramenta para expandir a investigação de geometria fractal; e
- A que considera a geometria fractal como uma ferramenta para aumentar o realismo da computação gráfica.

Em ambas abordagens, as áreas crescem mutuamente, o que é favorável aos dois ramos.

Na Seção 2.3.3 será apresentada a abordagem vida artificial. Essa seção é de especial importância visto que o presente trabalho se ajusta na categoria de aplicações de vida artificial.

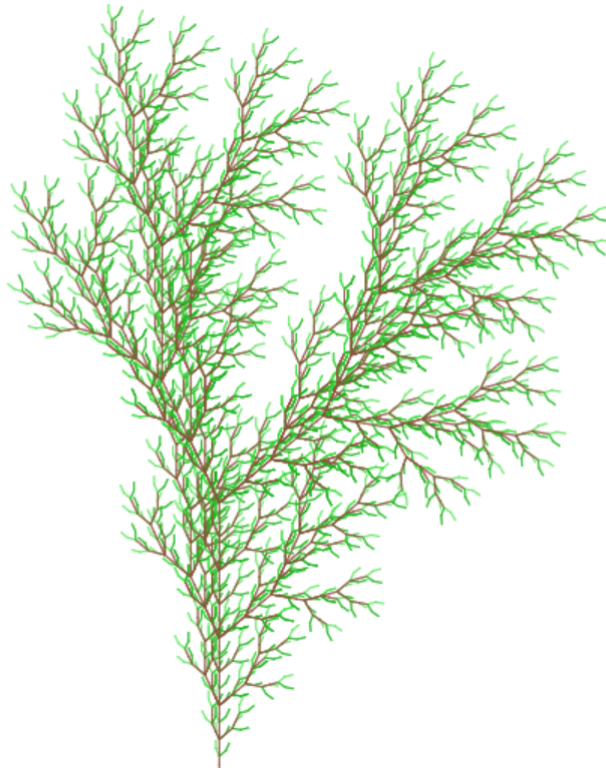


Figura 2.10: Exemplo de um fractal composto por bifurcações.

Vida Artificial

A vida artificial é baseada no estudo da vida na Terra para simular a vida em computadores e, às vezes, desenvolver formas sintéticas de vida sendo outra grande abordagem da simulação e emulação da natureza nos computadores [11].

A vida artificial corresponde ao campo de pesquisa que complementa a ciência biológica tradicional preocupada com a análise de organismos vivos tentando sintetizar comportamentos realistas e criaturas em computadores e em outros meios artificiais. Diferente da computação inspirada pela natureza, a vida artificial não está preocupada em resolver problemas complexos, mas grande parte dos sistemas de vida artificial são desenvolvidos apenas para simular e emular comportamentos ou organismos a fim de permitir o estudo através da simulação de fenômenos ou processos naturais, aumentando dessa forma o nosso entendimento sobre os processos da natureza [11].

O modelo proposto pela presente dissertação está situado na abordagem de vida artificial, uma vez que simula o comportamento de organismos virtuais e permite observar o comportamento desses organismos sob diferentes situações. Dessa forma, é importante detalhar essa abordagem apresentando trabalhos correlatos. Nesse sentido, mais informações e aplicações serão apresentadas a seguir.

Vida Artificial: Trabalhos correlatos

Nesta seção, serão apresentados alguns trabalhos relacionados a vida artificial. Tratar-se-á da interação e convivência grupal da ferramenta de criação de *biomorphs*, de criaturas virtuais, de peixes artificiais, sistemas auto-organizados e exemplos de autômatos celulares.

Comportamento Grupal

Uma das aplicações de vida artificial é a reprodução do comportamento de animais em um sistema computacional. Esse comportamento é baseado em rebanhos, manadas e cardumes reais. A representação não é uma tarefa fácil de ser modelada e exibida, visto que cada organismo deve ser controlado individualmente. E o processamento gráfico, quando incluído, torna-se complexo conforme a quantidade de elementos de simulação aumenta [11].

Contudo, é demonstrado que o comportamento grupal pode ser descrito como um conjunto de regras que são impostas sobre os indivíduos independente e que, de acordo com a interação deles com o ambiente, eles se comportam de forma conjunta [82]. Os agentes têm comportamentos que os permitem se movimentar de maneira coordenada com os membros de seu grupo.

Os grupos de indivíduos consistem de dois comportamentos opostos que devem ser balanceados [82]: desejo de ficar perto do grupo e o desejo de evitar colisões com os outros membros.

Para que os indivíduos possam se comportar de maneira grupal, três regras essenciais devem ser implementadas no comportamento de cada indivíduo [83]. São elas:

1. Separação e evasão de colisão: evitar a colisão com os outros membros do grupo que estão próximos (Figura 2.11 (a));
2. Sentido e velocidade apropriados: igualar a velocidade com os membros mais próximos e o sentido com a média dos demais membros, excluindo os mais próximos (Figura 2.11 (b)). Essa regra é complementar à primeira e juntas, elas garantem que os indivíduos sigam o grupo sem colidir uns com os outros;
3. Centralização ou coesão do grupo: permanecer próximo da posição média dos membros próximos, mas respeitando a distância necessária para cumprir a primeira regra (Figura 2.11 (c)). A centralização ou coesão garante a permanência dos membros no grupo.

O estudo do comportamento grupal (baseado em rebanhos, manadas e cardumes reais) em seres vivos, tem sido também aplicado em produções cinematográficas que envolvem o comportamento de organismos virtuais [11] como, por exemplo, O Rei Leão (1994, dirigido

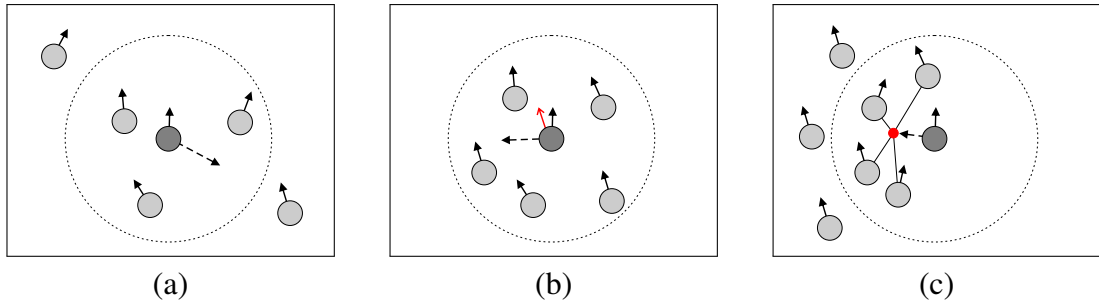


Figura 2.11: Ilustração do comportamento grupal dos indivíduos. (a) Separação e evasão de colisão; (b) Sentido e velocidade; e (c) Centralização ou coesão do grupo.

por Allers/Minkoff), Procurando Nemo (2003, dirigido por Andrew Stanton) e Jurassic Park (1993, dirigido por Steven Spielberg).

Biomorphs

Biomorphs é uma classe de organismos artificiais criados em um computador através de um programa nomeado O Relojoeiro Cego (*The Blind Watchmaker*) [84]. O Relojoeiro Cego é baseado em um Algoritmo Evolucionário (AE) que gera figuras de pontos e linhas com o objetivo de projetar biologia emergente baseada nos processos evolutivos neodarwinianos, que combinam a teoria da evolução das espécies por meio da seleção natural de Charles Darwin [5], a genética como base para a herança biológica de Gregor Mendel [85] e a genética populacional [86, 87].

A cada geração de *biomorphs*, um indivíduo é eleito como pai e, a partir dele, é gerado um conjunto B composto por m *biomorphs* que têm o código genético semelhante ao do *biomorph* gerador com poucas alterações (mutações). Com base no conjunto B , um elemento x é escolhido como pai para que novos *biomorphs* sejam gerados a partir dele [84].

Nas Equações 2.4 e 2.5 é apresentado um exemplo da geração de um conjunto de *biomorphs* a partir do pai B que tem o código genético (2, 5, 4, 1, 8, 3). Note que os descendentes (indivíduos que pertencem ao conjunto) possuem o código semelhante ao de B (Equação 2.4) assim como os descendentes de $X2$ (*biomorph* escolhido como o pai para a geração $n + 1$) têm o código genético semelhante ao de $X2$ (Equação 2.5). A evolução dos organismos se dá através da seleção (escolha do *biomorph* pai) e de sutis variações genéticas que ocorrem em cada indivíduo após a reprodução.

n^a geração:

$$B_{(2,5,4,1,8,3)} \rightarrow \{X1_{(2,5,4,1,7,3)}, X2_{(2,5,4,1,8,4)}, X3_{(2,4,4,1,8,3)}, \dots, Xm_{(2,5,6,1,8,3)}\} \quad (2.4)$$

$(n + 1)^a$ geração:

$$X2_{(2,5,4,1,8,4)} \rightarrow \{Y1_{(2,6,4,1,8,4)}, Y2_{(3,5,4,1,8,4)}, Y3_{(2,5,4,3,8,4)}, \dots, Ym_{(2,5,2,1,8,4)}\} \quad (2.5)$$

Com o código genético mutante, o desenvolvimento embrionário (*drawing function*) é responsável por transformar do código genético (genótipo) para as características físicas (fenótipo) dos *biomorphs* [84]. A Figura 2.12 ilustra a evolução de um *biomorph*.



Figura 2.12: Exemplos da evolução de um *biomorph* no decorrer de gerações.

Um exemplo da geração de *biomorphs* pode ser observada na Figura 2.12, onde a cada geração a quantidade de pontos e linhas aumenta (isso acontece quando o *biomorph* escolhido a cada geração é o que tem mais pontos e linhas dentre aqueles de sua geração).

Devido a evolução, com o passar das gerações a estrutura dos *biomorphs* é modificada. Dessa forma, os *biomorphs* assumem formas distintas. A Figura 2.13 mostra exemplos de *biomorphs* distintos.

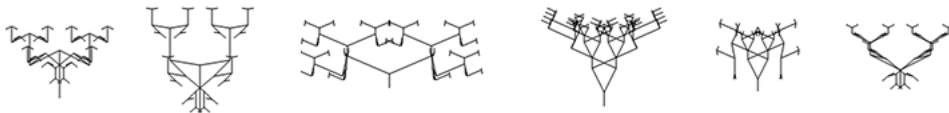


Figura 2.13: Exemplos de diferentes biomorphs.

Criaturas Virtuais

Criaturas virtuais são agentes inspirados na aparência e comportamento dos seres vivos. Eles habitam ambientes no qual interagem com eles e outras criaturas. Em alguns ambientes, é possível a interação do usuário com as criaturas. Contudo, grande parte de criaturas virtuais são utilizadas para fins de simulação [88].

Uma proposta de criaturas virtuais é *Creatures* [89], onde agentes vivem em um ambiente virtual gráfico e permite a interação em tempo real do usuário com os agentes criados. Os agentes têm implementado uma rede de múltiplos subsistemas que trabalham em conjunto para torná-los mais inteligentes e reais [89]. Um dos subsistemas que compõem as *Creatures* é uma rede neural que, apesar de simples, permite que elas aprendam a realizar tarefas, através das interações com o usuário.

Em conjunto com a aprendizagem, um indivíduo precisa realizar tarefas mentais, tais como, controlar seu foco de atenção, processar os dados sensoriais, selecionar um plano de ação e sequenciar os passos necessários para executar essa ação [90].

Além da inteligência agregada aos indivíduos do *Creatures*, eles contam com a combinação de diferentes processos e estruturas que sugerem um comportamento aproximado ao de seres vivos [89, 90].

Assim como os seres vivos, as *creatures* também possuem genes que determinam suas funções e estruturas e permitem a herança de características. Dessa forma as *creatures* que nascem têm aparência semelhante à dos pais que a geraram [90].

Peixes Artificiais

Peixes Artificiais (*Artificial Fishes*) são peixes provenientes da aplicação de vida artificial que habitam um mundo submarino virtual. Os peixes artificiais simulam o movimento, a aparência, o comportamento individual e os comportamentos coletivos complexos evidentes em muitos ecossistemas aquáticos [88].

Cada peixe artificial possui um modelo tridimensional com músculos que servem de atuadores, além de se deformarem a fim de se locomover de acordo com os princípios hidrodinâmicos e biomecânicos. Possuem também olhos e sensores que mapeiam o ambiente, além de um cérebro com centros de comportamento, percepção, aprendizagem, controle e coordenação [88].

O comportamento dos peixes artificiais inclui evasão de colisão, locomoção com diferentes partes do corpo, acasalamento, predação, fuga e aprendizagem. Com o passar do tempo e com prática, os peixes aprendem a se locomover e preda melhor.

Sistemas auto-organizados

Sistemas auto-organizados possibilitam a projeção e manipulação de sistemas descentralizados [91], onde os comportamentos não são facilmente previsíveis.

Uma proposta é o sistema auto-organizado *StarLogo* [91]. O sistema *StarLogo* possibilita a projeção e manipulação de sistemas auto-organizado (ou descentralizados) com o objetivo de fazer com o que o usuário os compreenda melhor. Outro objetivo era desenvolver um sistema que ações de agentes individuais resultariam em mudanças em grupos de indivíduos. Dessa forma o sistema seria capaz de modelar uma variedade de objetos reais, tais como, uma formiga em uma colônia, um carro em um engarrafamento, uma molécula em um gás, entre outros.

O sistema gera um ambiente onde podem ser criados uma grande quantidade de agentes, chamados de *turtles* que percebem e agem dentro da região no ambiente em que são capazes. O ambiente em que os agentes habitam é dividido em regiões chamadas de *patches* que armazenam informações sobre as ações que as *turtles* realizam nelas.

Dessa forma, com o *StarLogo*, é possível criar diferentes tipos de sistemas dinâmicos com agentes que seguem diferentes conjuntos de regras. Uma dessas abordagens é a relação presa-predador que foi implementada baseada no modelo de Lotka-Volterra que determina que a quantidade de predadores depende da quantidade de presas (vide Seção 2.2). O projeto

presa-predador implementado, chamado de *rabbits* é composto por agentes que simulam coelhos que precisam se alimentar de vegetação para continuarem vivos. Contudo, a vegetação é limitada. Desse modo, quando os agentes se alimentam de muita vegetação, ela se torna escassa e insuficiente para manter os agentes vivos, logo, alguns morrem por falta de alimento, enquanto a vegetação continua a crescer, tornando-se abundante para a pouca população de agentes que começa a crescer novamente por conta da disponibilidade de recursos.

Outro projeto implementado pelo *Starlogo* é o cupinzeiro que simula a construção realizada por cupins. O conjunto de regras de cada agente é a de agrupamento. Nesse sentido, os cupins andam aleatoriamente pelo ambiente procurando por pequenos pedaços de madeiras. Quando encontram um, pegam-no e o levam até o pedaço de madeira mais próximo. Com o tempo, alguns grupos são formados e desfeitos. A tendência é a redução na quantidade de grupos de pedaços de madeiras e o aumento da quantidade de madeiras em cada grupo.

Outro projeto implementado é o congestionamento de carros em uma estrada. Esse projeto demonstra que um engarrafamento pode não ter causa como radares ou acidentes, apenas a quantidade excessiva de veículos. O conjunto de regras implementado em cada agente (veículo) consiste em acelerar até atingir a velocidade máxima se não houver carros a frente e reduzir se houver algum carro na frente. Com os agentes indo na mesma direção, se um único agente estiver com a velocidade reduzida, o próximo também reduzirá e assim sucessivamente, gerando um congestionamento.

Simulações de Autômatos Celulares

Autômatos Celulares é uma classe de sistemas matemáticos determinísticos, temporal e espacialmente discretos, caracterizados por interações locais e uma forma de evolução inerentemente paralela [92].

Autômatos celulares é uma das formas mais simples de representar sistemas complexos de forma matemática [92]. Da mesma forma, autômatos celulares são idealizações extremamente úteis do comportamento dinâmico de muitos sistemas reais, e.g., fluídos físicos, redes neurais, sistemas moleculares dinâmicos, ecologias naturais, comando militar, redes de controle e economia.

Autômatos celulares são um bom exemplo de sistemas compostos por unidades que têm pouca influência, mas que têm comportamentos complexos quando agem em conjunto [93].

Um exemplo famoso de Autômatos Celulares é o jogo da vida (*The Game of Life*) desenvolvido por John Conway [94]. O nome teve origem da analogia com o surgimento, extinção e evolução de sociedades de organismos vivos [11]. O jogo da vida é executado em um tabuleiro potencialmente infinito em todas as direções. Cada célula do tabuleiro pode ter dois estados: viva ou morta. A cada geração (ou iteração), o estado de uma célula pode ou não ser alterado, de acordo com as células vizinhas. O conjunto de regras incluem:

- Uma célula morta torna-se viva se houver exatamente 3 (três) células vizinhas vivas, por reprodução;
- Uma célula viva torna-se morta se houver mais de 3 (três) células vizinhas vivas por superpopulação;
- Uma célula viva torna-se morta se houver menos que 2 (duas) células vizinhas vivas por subpopulação; e
- Uma célula se mantém viva se tiver 2 ou 3 células vizinhas vivas.

Alguns exemplos de formas no jogo da vida são ilustrados na Figura 2.14.

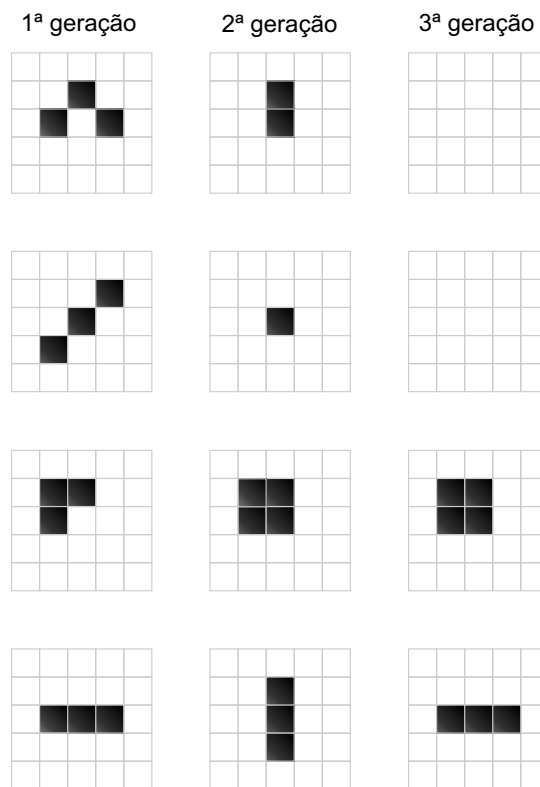


Figura 2.14: Conjuntos de células em um tabuleiro de O jogo da vida. Os conjuntos à direita são gerações posteriores.

Animais virtuais inteligentes

Os animais virtuais inteligentes é uma proposta de Vida Artificial que se assemelha às criaturas virtuais, porém eles não possuem interação com o usuário durante a execução [95]. Esse modelo gera um ambiente virtual, chamado de OMOSA, que simula um ambiente real em 3D (3 dimensões), onde os seres virtuais convivem.

Os seres podem ser de duas espécies distintas, uma presa (*Yernt*) e outra predadora (*To-oru*). Ambas espécies utilizam comportamento grupal principalmente no momento da caça, em que há maior vantagens em se comportarem em conjunto. O comportamento grupal dos

animais virtuais em OMOSA é semelhante ao enxame de partículas já citado, em que cada organismo tem o desejo de permanecer perto do grupo, mas longe o suficiente para evitar colisões entre os membros [95].

Os seres contam também com um nível de saúde, estamina, fase da vida que varia entre cada organismo, bem como expectativa de vida, campo de visão, velocidade e regeneração de vida que são comuns para todos os indivíduos [95].

Para finalizar a seção de trabalhos correlatos, é apresentada na Tabela 2.1 a comparação entre as propostas apresentadas anteriormente no que tange a algumas características. É importante ressaltar que a proposta Demiourgos será apresentada nessa dissertação, na Seção 3.4.1, como proposta de aplicação do modelo proposto na presente dissertação.

A Tabela 2.1 mostra uma comparação entre algumas aplicações de Vida Artificial incluindo a proposta Demiourgos que será apresentada na Seção 3.4.1 como implementação do modelo proposto. As aplicações são avaliadas com base em um conjunto de características (comportamento grupal, reprodução, hereditariedade, predatismo, alimentação, campo de visão, envelhecimento, mutação, doença, camuflagem, fuga e morte) que podem ou não terem sido implementadas em cada trabalho avaliado. A maior parte das aplicações em Vida Artificial possui menos da metade das características observadas enquanto a proposta que possui mais características implementadas é a Demiourgos. A única característica não implementada pelo sistema Demiourgos é o comportamentamento grupal.

Tabela 2.1: Tabela de comparação entre as propostas apresentadas sobre Vida Artificial.

	<i>Comportamento grupal</i>	<i>Reprodução</i>	<i>Hereditariedade</i>	<i>Predatismo</i>	<i>Alimentação</i>	<i>Campo de visão</i>	<i>Envelhecimento</i>	<i>Mutação</i>	<i>Doença</i>	<i>Camuflagem</i>	<i>Alimentação</i>	<i>Fuga</i>	<i>Morte</i>
Enxame de partículas	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Colônia de formigas	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Biomorphs	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Creatures	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Não
Peixes Artificiais	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
StarLogo	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim
Game of life	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim
Animais em OMOSA	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Demiourgos	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

3 SOLUÇÃO PROPOSTA

Este trabalho foi baseado em pesquisa por observação através do estudo da espécie *Pæcilia reticulata* (lebistes) apresentado por John A. Endler [3] (Seção 2.1.2). Foram definidos os atributos e as características do ambiente e dos demais elementos que constituem o modelo proposto, bem como os métodos de interação entre eles. O trabalho de John Endler serviu como motivação inicial e será estudado como uma aplicação específica do modelo geral proposto.

A solução proposta será descrita em duas etapas. Primeiro, será apresentado o modelo geral proposto, bem como sua aplicação a dois cenários: (a) estudo da evolução da camuflagem em lebistes; e (b) estudo da evolução da camuflagem em animais terrestres em um cenário fictício. Em seguida, tratar-se-á da implementação de um simulador que é avaliado para estes dois casos particulares. A seguir será apresentado o modelo geral proposto.

3.1 MODELO GERAL

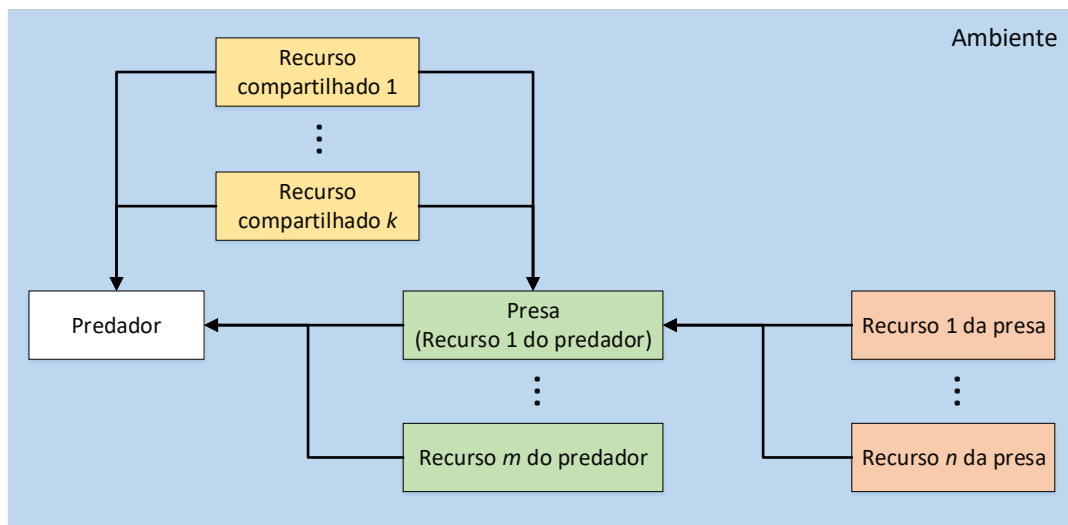


Figura 3.1: Modelo geral, composto por um gerente, um ambiente, presas, predadores, recursos para presas, recursos para predadores e recursos compartilhados.

O modelo geral é composto por um gerente, um ambiente, presas, predadores, recursos para presas, recursos para predadores e recursos compartilhados. O modelo geral incluindo seus elementos pode ser observado na Figura 3.1. O gerente, responsável pela administração dos demais elementos, não aparece na figura e é tratado na Seção 3.1.1.

As presas e os predadores representam espécies, logo, eles têm a necessidade de consumir recursos. No modelo, existem recursos específicos para presas e para predadores. As presas

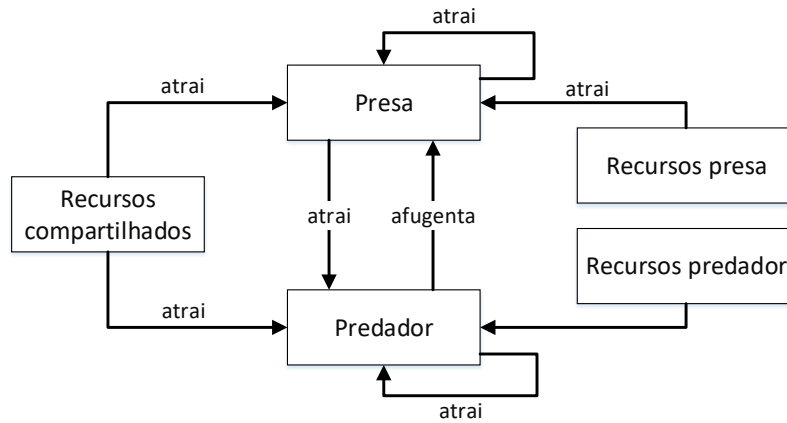


Figura 3.2: Relação entre os elementos constituintes do modelo geral.

fazem parte do conjunto de recursos dos predadores. Além dos recursos específicos para presas e para predadores, existem também recursos compartilhados, que estabelecem uma relação de competitividade entre ambos.

Para que os predadores sobrevivam por mais tempo, precisam se alimentar de presas e outros recursos. Por outro lado, para que as presas sobrevivam por mais tempo, precisam fugir dos predadores e também consumir recursos. Isso gera uma relação de competitividade entre estes dois organismos virtuais [5]. No modelo proposto, há ainda competitividade entre as próprias presas ou entre os próprios predadores pois necessitam dos mesmos recursos específicos [2, 10]: predadores competem por presas e por outros recursos para predadores, e presas competem por recursos para presas. Os organismos virtuais são atraídos por seus recursos e por outros organismos do mesmo tipo com a finalidade de reprodução, como está representado na Figura 3.2.

Assim como nos ecossistemas reais, ambas espécies representadas no modelo têm o objetivo principal de sobreviver e perpetuar a sua espécie.

3.1.1 Gerente

O gerente é responsável por administrar os elementos do modelo: o ambiente, as presas, os predadores, os recursos das presas, os recursos dos predadores e os recursos compartilhados. A relação entre o gerente e os demais elementos está representado na Figura 3.3.

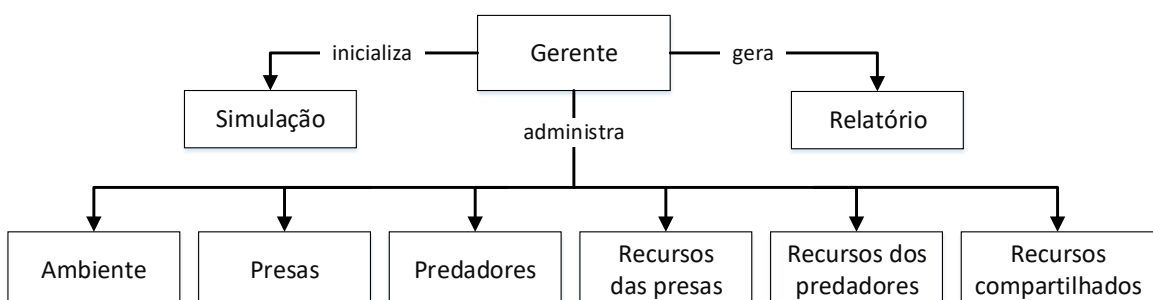


Figura 3.3: Funções do gerente.

O Apêndice B.2 sintetiza os comportamentos do gerente. Na Seção 3.1.2, é apresentada a descrição do ambiente de simulação.

3.1.2 Ambiente

O ambiente é o local onde as presas, os predadores, os recursos das presas, os recursos dos predadores e os recursos compartilhados são posicionados.

É possível que o ambiente varie suas características ao longo do tempo, o que pode contribuir para a seleção natural. Exemplos de características são temperatura, humidade, acidentes geológicos etc. Na Seção 3.2.1, que descreve o elemento ambiente aplicado ao caso de estudo dos lebetes, a característica a ser variada é a cor predominante do ambiente, fator que influencia na camuflagem. A maneira de se variar uma característica qualquer depende do que se deseja simular.

3.1.3 Recursos

Os recursos representam as necessidades que das presas e dos predadores. O recurso principal apresentado no modelo geral é o alimento. Naturalmente, presas e predadores possuem a necessidade de se alimentar. Contudo, eles não se alimentam do mesmo recurso pois seus tipos de alimentação são diferentes.

Os recursos das presas são fixos no ambiente e, após consumidos, desaparecem do ambiente e reaparecem após um período de tempo. Com relação aos predadores, o recurso alimentar são as presas.

Assim como os recursos das presas, os recursos compartilhados são fixos no ambiente. Eles variam de forma sazonal, ou seja, em um determinado período há abundância e em outro há escassez. Tais recursos tendem a aproximar presas e predadores, visto que ambos necessitam deles.

Na Seção 3.1.4 serão descritos as presas e os predadores.

3.1.4 Presas e predadores

No modelo proposto, as presas e os predadores são seres virtuais que representam seres biológicos. Eventualmente, alguns dos recursos específicos também podem representar seres biológicos. No cenário fictício, descrito na Seção 3.3, um dos recursos das presas são plantas, por exemplo.

Devido à semelhança entre as presas e os predadores, seus atributos e comportamentos em comum serão descritos em seções únicas. Entretanto, os atributos e comportamentos distintos entre as presas e os predadores serão descritos separadamente.

3.1.4.1 Atributos comuns a presas e predadores

As presas e predadores possuem um código de características a semelhança do código genético de um ser vivo. O código de características identifica os seres virtuais, visto que são únicos.

Os atributos que caracterizam as presas e os predadores são: *código*, *código do parceiro*, *código do alvo*, *código da ameaça*, *idade*, *idade máxima*, *categoria*, *velocidade*, *campo de visão*, *cor (RGB)*, *camuflagem*, *mutação*, *sexo*, *gestação*, *resguardo*, *posição (X e Y)*, *tamanho* e *necessidade de recursos*, conforme mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Estrutura do código de características de um organismo virtual. O código de características é um vetor que contém todas as características da presa ou predador.

Os atributos supracitados serão descritos na sequência.

Código

O atributo *código* é um número pertencente ao conjunto dos números naturais (\mathbb{N}) definido ordinalmente de acordo com a criação de um novo indivíduo virtual. O *código* é utilizado para identificar os seres virtuais, visto que cada um possui um código identificador único.

Uma presa ou predador pode armazenar códigos de outros organismos virtuais com o objetivo de identificar potenciais ameaças, alvos e parceiros. Essa característica será descrita posteriormente.

Idade

A *idade* é um atributo que indica o tempo de vida do organismo virtual. A *idade* é representada em *unidades de vida (uv)*. A *idade* do ser virtual é incrementada até que atinja o valor dado por *idade máxima*, quando ele morre por senescência.

É importante ressaltar que nem sempre a *idade* de um indivíduo virtual atingirá sua *idade máxima*. Além da morte por velhice, um indivíduo pode morrer por falta de recursos ou por predação (se for uma presa).

A vida de um organismo virtual é dividida em *categorias*. A *idade* atual dele define a *categoria* em que ele se encontra. O atributo *categoria* representa os períodos de vida de um ser vivo. Essa relação pode ser observada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Categorias das presas e predadores.

Categoria	Período da vida	% da vida Presa	% da vida Predador
1	Pré-reprodutivo	$PC1_{ps}$ iniciais	$PC1_{pd}$ iniciais
2	Reprodutivo (1ª metade)	próximos $PC2_{ps}$	próximos $PC2_{pd}$
3	Reprodutivo (2ª metade)	próximos $PC3_{ps}$	próximos $PC3_{pd}$
4	Pós-reprodutivo	$PC4_{ps}$ finais	$PC4_{pd}$ finais

Inicialmente, quando nasce, o indivíduo virtual pertence à *categoria* 1, mas com o tempo, passa sucessivamente da *categoria* 1 à 4, para depois morrer.

Por exemplo, em uma simulação onde $PC1_{ps} = 10\%$, $PC2_{ps} = 40\%$, $PC3_{ps} = 40\%$ e $PC4_{ps} = 10\%$ para os indivíduos presa, e $PC1_{pd} = 18\%$, $PC2_{pd} = 23\%$, $PC3_{pd} = 24\%$ e $PC4_{pd} = 35\%$ para os indivíduos predador, a divisão da vida dos organismos nas categorias pode ser ilustrada na Figura 3.5.

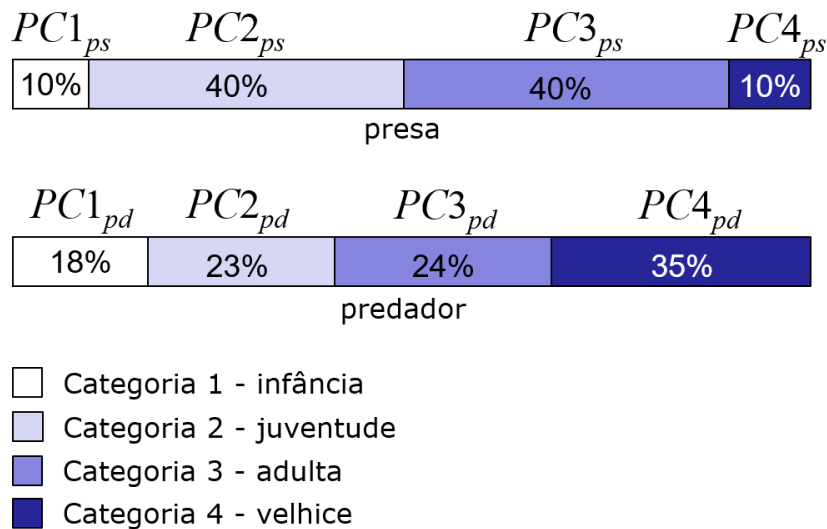


Figura 3.5: Exemplo da divisão da vida dos organismos virtuais em categorias. É importante ressaltar que da forma com que está distribuído nesse exemplo, o período reprodutivo (*categorias* 2 e 3) das presas será maior, logo, elas terão maior probabilidade de se reproduzir.

A *categoria* influencia alguns outros atributos e comportamentos dos seres virtuais. Por exemplo, os organismos que se encontram na *categoria* 1 não podem procriar, por serem

muito jovens. O mesmo ocorre com os organismos na *categoria* 4, por já terem passado da idade fértil.

Além da fertilidade, o valor do atributo *categoria* também influencia os atributos *velocidade* e *campo de visão* descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Atributos da *idade*.

Parâmetro	Descrição
$PC1_{ps}$	Porcentagem da vida da presa na categoria 1
$PC2_{ps}$	Porcentagem da vida da presa na categoria 2
$PC3_{ps}$	Porcentagem da vida da presa na categoria 3
$PC4_{ps}$	Porcentagem da vida da presa na categoria 4
$PC1_{pd}$	Porcentagem da vida do predador na categoria 1
$PC2_{pd}$	Porcentagem da vida do predador na categoria 2
$PC3_{pd}$	Porcentagem da vida do predador na categoria 3
$PC4_{pd}$	Porcentagem da vida do predador na categoria 4

Velocidade

A *velocidade* é um valor inteiro calculado no decorrer da vida de um indivíduo virtual de acordo com a *categoria* em que se encontra e determina a sua velocidade de deslocamento.

O atributo *velocidade* pode variar entre 0 e 9 de acordo com a Tabela 3.3. No início da vida de um indivíduo, a *velocidade* é sorteada entre 0 e 4, pois ele se encontra na *categoria* 1. A razão da *velocidade* é mantida ao longo da vida do organismo, ou seja, se durante a infância do indivíduo (*categoria* 1) ele tiver uma *velocidade* baixa, quando passar para a próxima *categoria*, continuará a ser baixa em relação a outros indivíduos que estão na mesma fase de vida e que apresentaram uma velocidade inicial na infância maior que a dele. Por exemplo, se um organismo virtual tiver o valor de sua *velocidade* como 2 enquanto está na categoria 1 ou 4, quando se encontra nas categorias 2 ou 3, o valor de sua *velocidade* se torna 7, ou seja, a diferença entre os valores de *velocidade* entre as categorias é de 5 unidades.

Tabela 3.3: Valores da *velocidade* por categoria.

Categoria	Período da vida	Intervalo de sorteio
1	Pré-reprodutivo	Entre 0 e 4
2	Reprodutivo	Entre 5 e 9
3	Reprodutivo	Entre 5 e 9
4	Pós-reprodutivo	Entre 0 e 4

O intervalo de tempo que um organismo leva para se movimentar de uma célula a outra é definido pela Equação 3.1:

$$TE = FDM_x - v \left(10 \times \frac{FDM_x}{100} \right) \quad \text{seja } x = ps \text{ ou } pd, \quad (3.1)$$

onde TE é o *tempo de espera* entre cada movimento, FDM_x ($x = ps$ ou pd) é o *fator de delay máximo* e v é o atributo *velocidade* do organismo virtual, escolhida de acordo com a Tabela 3.3. Por exemplo, se $FDM_x = 1$ segundo e $v = 5$, então $t = 0.5$ segundo. Ou seja, o indivíduo irá se movimentar a uma velocidade de 2 células por segundo. A relação entre o *tempo de espera* e a *velocidade* para $FDM_x = 1$ segundo pode ser observado na Figura 3.6.

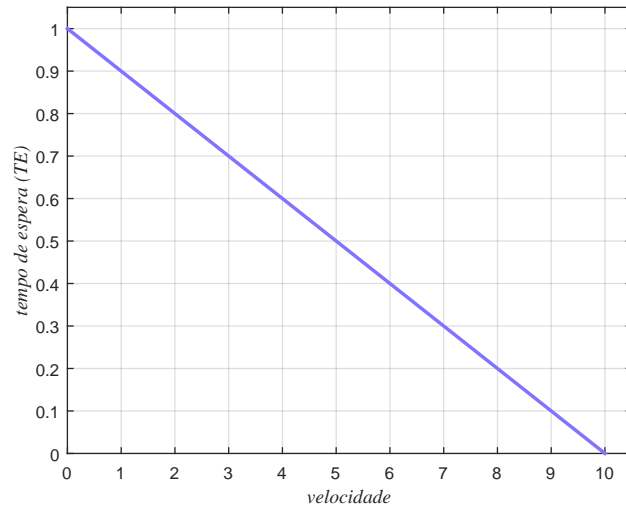


Figura 3.6: Relação entre TE e o atributo *velocidade* para $FDM_x = 1$.

Outro atributo que é definido de acordo com a *categoria* é o *campo de visão*, descrito na sequência.

Campo de visão

O *campo de visão* é uma área ao redor do indivíduo que indica os limites até onde o organismo virtual está capacitado a detectar possíveis parceiros, alvos (recursos específicos e compartilhados para presas e predadores) ou ameaças (predadores para presas). A Figura 3.7 exemplifica o *campo de visão* de um organismo virtual.

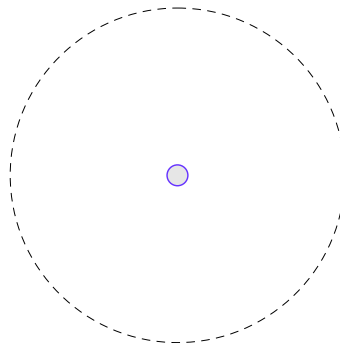


Figura 3.7: Atributo *campo de visão*, limite dentro do qual o organismo virtual está apto a perceber elementos do ambiente.

Cada indivíduo virtual possui dois campos de visão independentes: o *campo de visão de reprodução* e o *campo de visão de recursos*. Apesar de ambos serem áreas circulares ao

redor do organismo virtual, os tamanhos deles variam de forma independente ao longo da vida do organismo.

No modelo proposto, podem haver múltiplos *campos de visão de recursos*, cada qual com suas especificidades. Aqui, porém, será apresentado apenas o *campo de visão de alimentação*, pois assume-se que esse recurso é necessário em qualquer cenário.

O *campo de visão de alimentação* de um organismo virtual é utilizado para detectar possíveis alvos ou ameaças e o tamanho dele é variável de acordo com a *categoria*, pois seres virtuais jovens (*categoria 1*) ou senis (*categoria 4*) não possuem a visão tão aguçada quanto aqueles que se encontram nas *categorias 2* ou *3*. O tamanho do *campo de visão de alimentação* é limitado pelo valor máximo do *campo de visão de alimentação* ($CVA_{máx}$).

$$M_{CVA} = \frac{FR_{CVA} + CVA_{máx}}{2} \quad (3.2)$$

A Figura 3.8 exemplifica o tamanho do *campo de visão de alimentação* de um organismo virtual. Quando um organismo nasce, pertence à *categoria 1* e o tamanho de seu *campo de visão de alimentação* (CVA) é um valor entre o fator de redução do campo de visão de alimentação (FR_{CVA}) e a média aritmética entre $CVA_{máx}$ e FR_{CVA} (M_{CVA}). O valor de M_{CVA} é definido conforme a Equação 3.2. Quando o organismo passa para a *categoria 2*, o tamanho de seu *campo de visão de alimentação* aumenta $M_{CVA} - FR_{CVA}$ e quando o organismo virtual passa para a *categoria 4*, seu *campo de visão de alimentação* diminui $M_{CVA} - FR_{CVA}$. Dessa forma, a razão do tamanho do *campo de visão* é mantida ao longo da vida do organismo virtual, assim como a *velocidade*.

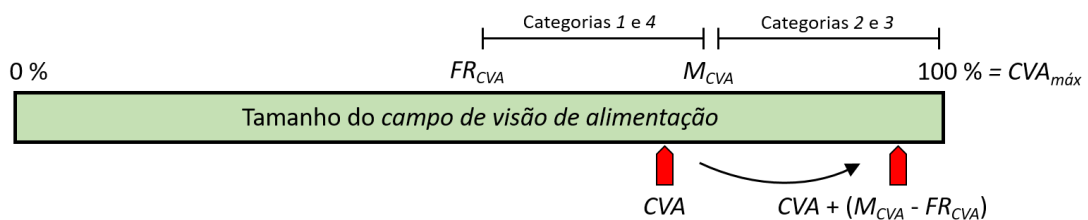


Figura 3.8: O tamanho do *campo de visão de alimentação* varia entre o fator de redução (FR_{CVA}) e o valor máximo ($CVA_{máx}$) dependendo da *categoria* em que o organismo virtual se encontra. O marcador de cor vermelha representa o tamanho do *campo de visão de alimentação* sorteado aleatoriamente e sofre alteração quando o organismo virtual passa de *categoria*.

Por exemplo, se o tamanho do *campo de visão de alimentação* for igual a 100 células do *grid*, FR_{CVA} igual a 50 e M_{CVA} igual a 75, e um organismo se encontrar na *categoria 1*, seu CVA será um valor sorteado entre 50 e 75, e quando o organismo estiver nas *categorias 2* e *3*, seu valor de CVA será aumentado em 25 unidades. A Tabela 3.4 apresenta a porcentagem do *campo de visão de alimentação* que pode ser utilizado por um organismo de acordo com a *categoria* em que se encontra.

Tabela 3.4: Porcentagem do *campo de visão de alimentação* por categoria.

Categoria	Período da vida	% do sentido
1	Pré-reprodutivo	Entre FR_{CVA} e M_{CVA}
2	Reprodutivo	Entre M_{CVA} e $CV A_{máx}$
3	Reprodutivo	Entre M_{CVA} e $CV A_{máx}$
4	Pós-reprodutivo	Entre FR_{CVA} e M_{CVA}

O comportamento de variação do *campo de visão de reprodução* ao longo da vida de um organismo virtual é diferente do que acontece com o *campo de visão de alimentação*. O *campo de visão de reprodução* de um indivíduo é inexistente no início de sua vida e permanece assim até que ele passe para a categoria 2. A partir de então, seu *campo de visão de reprodução* varia de acordo com o semi-círculo positivo de uma função senoidal, como pode ser observado na Figura 3.9. A vértice da função se encontra no fim da categoria 2 e início da categoria 3, quando a capacidade reprodutiva do indivíduo começa a decair até que seja inexistente, isso acontece no início da categoria 4 e se mantém até o fim da vida.

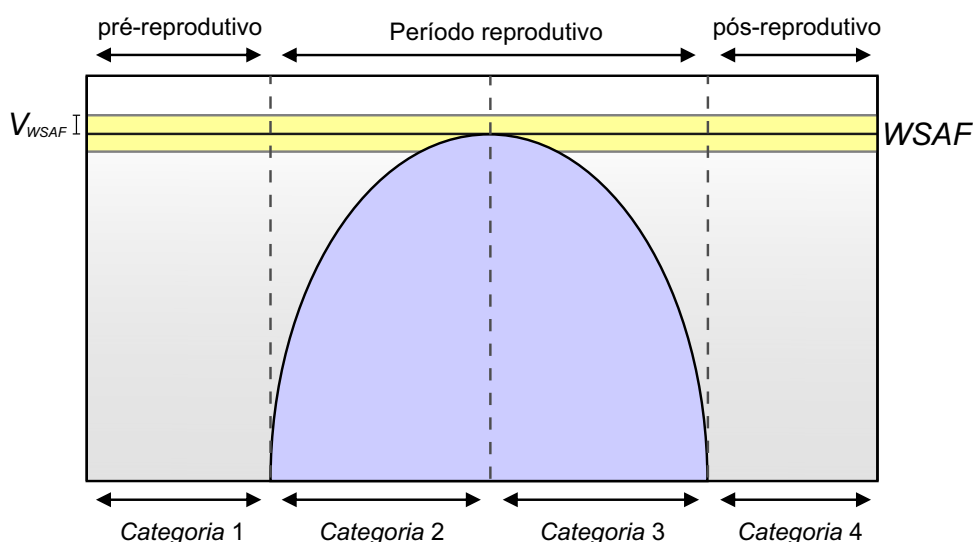


Figura 3.9: Relação entre o tempo de vida de um organismo virtual (eixo horizontal) e o tamanho do *campo de visão de reprodução* (eixo vertical). O tamanho do *campo de visão de reprodução* é zero durante a categoria 1, crescente na categoria 2, decrescente na categoria 3 e zero na categoria 4.

A capacidade reprodutiva está diretamente relacionada ao tamanho do *campo de visão de reprodução*, visto que quanto maior o campo de visão, mais o organismo virtual terá chances de identificar possíveis parceiros e se reproduzir. Dessa forma, no modelo proposto, a capacidade reprodutiva dos seres vivos é representada pelo tamanho do *campo de visão de reprodução* dos organismos virtuais. O valor máximo é representado por $WSAF$, que possui um fator de variação (V_{WSAF}), mostrado na Figura 3.9.

Cor

Assim como o ambiente, os organismos virtuais também possuem cores representadas no espaço de cores RGB .

É importante ressaltar que a diferença entre os valores da cor de um organismo e do ambiente vai definir o grau de camuflagem do indivíduo conforme demonstrado na Equação 3.3:

$$D = |r_1 - CA_r| + |g_1 - CA_g| + |b_1 - CA_b|, \quad (3.3)$$

onde, r_1 , g_1 e b_1 são os componentes de cor do indivíduo, CA_r , CA_g e CA_b são os componentes de cor do ambiente e D é a soma das diferenças absolutas entre as cores do organismo e do ambiente. Um indivíduo do tipo presa está camuflado quando o valor de D for menor do que um determinado *nível de perseguição* (NP). Neste caso, os predadores não conseguem vê-la e, conseqüentemente, ela não corre o risco de ser predada. Exemplos de dois ambientes de cores distintas são apresentados na Figura 3.10. O primeiro ambiente (Figura 3.10 (a)) contém uma presa não camufladas e o segundo ambiente (Figura 3.10 (b)) contém uma presa camuflada. Da mesma forma como as presas podem se camuflar e passar despercebido dentro do *campo de visão de alimentação* de um predador, um predador pode se camuflar e se aproximar de uma presa a fim de predá-la sem ser visto.

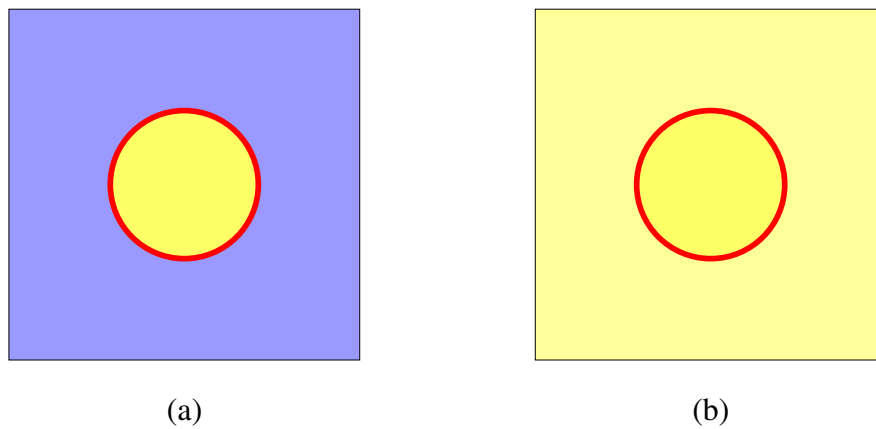


Figura 3.10: Dois ambientes de cores distintas: (a) exemplo de presa não camufladas; e (b) exemplo de presa camuflada. A cor da borda não influencia na camuflagem, ela apenas indica o *sexo* do organismo.

Considerando o *nível de perseguição* e o valor de D definido na Equação 3.3, a característica *camuflagem* do organismo c é definida pela Equação 3.4. Logo, o atributo *camuflagem* indica se um organismo está ou não camuflado.

$$c(D, NP) = \begin{cases} \text{camuflado} & , \text{ se } D \leq NP \\ \text{n\~{a}o-camuflado} & , \text{ se } D > NP \end{cases} \quad (3.4)$$

Quando um novo indivíduo nasce, a *cor* dele é definida pela média aritmética das *cores*

dos pais no momento de seu nascimento e permanece constante até o fim de sua vida. Contudo, as cores dos organismos pertencentes à população inicial é definida aleatoriamente, pois seus genitores são desconhecidos.

A *cor* é apenas um dos atributos que podem ser selecionados por meio da imposição de restrições ambientais. Como o presente trabalho trata apenas da camuflagem, a característica principal é a *cor*.

Mutação

Além disso, alguns indivíduos podem apresentar *mutação*. Esse atributo simula mutações genéticas que são variações aleatórias de alguma característica. Neste trabalho, a característica será a *cor*.

A característica geral da mutação apresentada pelos seres vivos é modelada unicamente como uma mudança no atributo *cor* do organismo virtual.

A mutação é aplicada sobre uma porcentagem de indivíduos no momento de seu nascimento. Caso um organismo sofra mutação, sua cor é sorteada aleatoriamente (respeitando os limites do espaço de cor *RGB*), independentemente das *cores* dos pais que o geraram.

Considere uma função θ que corresponde ao sorteio aleatório equiprovável de um número inteiro entre 1 e 100, incluídos, e um limiar de intensidade de mutação (IM). A característica *mutação* do organismo virtual m é definida por $m(\theta, IM_x)$, conforme a Equação 3.5. Dessa forma, o atributo *mutação* indica se um organismo é ou não mutante.

$$m(\theta, IM_x) = \begin{cases} mutado & , se \theta \leq IM_x, x = ps \text{ ou } pd \\ não-mutado & , se \theta > IM_x, x = ps \text{ ou } pd \end{cases} \quad (3.5)$$

Tabela 3.5: Atributos da *mutação*.

Parâmetro	Descrição
IM_{ps}	Intensidade de mutação das presas
IM_{pd}	Intensidade de mutação das predadores

Doença

O atributo *doença* simula enfermidades nos indivíduos virtuais. Considere uma função θ que corresponde ao sorteio aleatório equiprovável de um número inteiro entre 1 e 100, incluídos, e um limiar de *intensidade da doença* (ID). A característica *doença* do indivíduos d é definida pela Equação 3.6. O atributo indica se um indivíduo está ou não doente.

$$d(ID_x) = \begin{cases} doente & , se \theta \leq ID_x, x = ps \text{ ou } pd \\ não-doente & , se \theta > ID_x, x = ps \text{ ou } pd \end{cases} \quad (3.6)$$

Caso uma criatura esteja doente, sua expectativa de vida (ou *idade máxima*) é reduzida por um fator proporcional à expectativa de vida dos organismos virtuais que não estão doentes.

Tabela 3.6: Atributos da *doença*.

Parâmetro	Descrição
ID_{ps}	Intensidade de doença das presas
ID_{pd}	Intensidade de doença das predadores

Sexo

O *sexo* pode ser definido como masculino ou feminino. O valor desse parâmetro é escolhido aleatoriamente no momento do nascimento de um novo indivíduo de acordo com a Equação 3.7, considerando uma função θ que corresponde ao sorteio equiprovável de um número dentre os valores 0 e 1. O *sexo* do organismo será definido de acordo com a Equação 3.7.

$$sexo = \begin{cases} masculino & , se \theta = 0 \\ feminino & , se \theta = 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

Considerando o processo de reprodução para dar continuidade às espécies, os organismos podem ter parceiros sexuais. Os parceiros são de *sexos* opostos, possibilitando a representação da reprodução sexuada.

O *sexo* restringe a validade dos atributos *gestação* e *resguardo*, que são válidos apenas para indivíduos virtuais do *sexo* feminino, visto que esses atributos não se aplicam aos organismos virtuais do *sexo* masculino porque eles não emprenham.

O atributo *gestação* é o tempo entre o momento da cópula de dois organismos virtuais (um indivíduo e seu parceiro sexual de mesmo tipo, mas de *sexo* diferente) e o momento do nascimento do novo indivíduo virtual. Quando há uma cópula entre dois organismos, o atributo *gestação* do indivíduo do *sexo* feminino é definido pelo *tempo de gestação* (TG_{ps} e TG_{pd} , para presas e predadores, respectivamente). Depois disso, o tempo de *gestação* é decrementado a cada segundo até que atinja o valor 0 (zero).

O atributo *resguardo* representa o tempo entre o momento do concebimento de um novo organismo virtual e o momento que o indivíduo do *sexo* feminino (mãe) poderá estar apto a procriar novamente. Quando um novo indivíduo é gerado, o atributo *resguardo* do organismo do *sexo* feminino que o gerou, é definido pelo *tempo de resguardo* (TR_{ps} e TR_{pd} , para presas e predadores, respectivamente). Depois disso, o tempo de *resguardo* é decrementado a cada segundo até que atinja o valor 0 (zero), então o organismo virtual do *sexo* feminino que gerou o novo indivíduo estará apto a procriar novamente.

A descrição dos parâmetros relacionados à *gestação* e ao *resguardo* estão resumidos na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Parâmetros do *sexo*.

Parâmetro	Descrição
TG_{ps}	Tempo de gestação das presas
TG_{pd}	Tempo de gestação dos predadores
TR_{ps}	Tempo de resguardo das presas
TR_{pd}	Tempo de resguardo dos predadores

Posição

Cada organismo está sempre posicionado em uma das células do *grid* (ambiente). Como o ambiente é representado por um plano bidimensional, a *posição* de um indivíduo virtual é composta por dois valores que definem a sua localização no *grid*, conforme ilustrado na Figura 3.11.

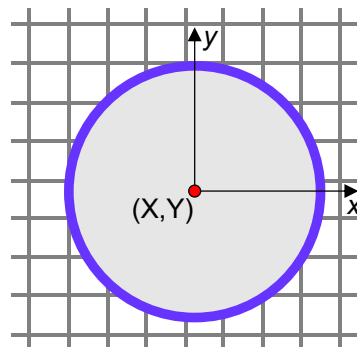


Figura 3.11: A *posição* de um organismo é definida pela posição da célula central do círculo que representa graficamente um organismo no ambiente.

No momento do nascimento, a *posição* inicial do novo organismo é definida inicialmente pela *posição* do organismo de sexo feminino que o gerou. Contudo, no início da simulação, cada indivíduo virtual é posicionado aleatoriamente.

Tamanho

O *tamanho* é o valor do raio do círculo, dado em células do *grid*, que representa um indivíduo posicionado em (X, Y) , conforme apresentado na Figura 3.12. Presas e predadores têm tamanhos diferentes. Para presas, $r = T_{ps}$ e para predadores $r = T_{pd}$.

O valor do *tamanho* pode variar de acordo com o tipo de organismo (presa ou predador) e permanece inalterado durante o ciclo de vida dele. Ou seja, independentemente da *idade*, o indivíduo terá o mesmo *tamanho*.

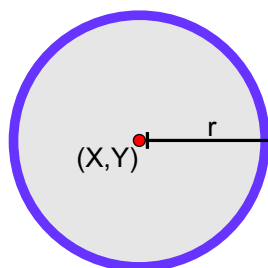


Figura 3.12: O *tamanho* de um indivíduo é a distância r entre sua posição (X, Y) e a borda do círculo que o representa graficamente.

Para efeitos de melhor representação visual, o *tamanho* dos organismos do tipo presa é menor que o *tamanho* dos organismos do tipo predador. Por padrão, o *tamanho* das presas é definido como 4 células e os predadores como 8 células.

Necessidade de recursos

Os indivíduos virtuais possuem o atributo *necessidade de recursos*. Se um indivíduo ficar muito tempo sem consumir os recursos necessários para sua sobrevivência, corre o risco de morrer. Os detalhes a respeito da dinâmica do consumo de recursos serão explicados na Seção 3.1.4.2 que abrange os comportamentos dos organismos.

3.1.4.2 Comportamento de presas e predadores

Nesta seção serão descritos os comportamentos das presas e dos predadores. Durante o ciclo de vida das presa e predadores são realizadas diversas verificações que definem a situação atual do organismo para que ele possa tomar uma decisão sobre como agir, principalmente influenciando seu movimento. Uma presa, por exemplo, precisa decidir se deve alimentar-se ou fugir de um predador. Um modelo comportamental de um ser vivo generalizado foi desenvolvido e é apresentado nos Apêndices B.4.1 a B.4.8.

As ações dos indivíduos virtuais resumem-se em *movimentação*, *reprodução*, e *consumo de recursos*.

Movimentação

Como descrito na Seção 3.1.2, o ambiente de simulação é dividido em células. As presas e predadores que estão inseridos no ambiente, movimentam-se célula a célula, aproximando-se ou afastando-se de um ponto. É importante descrever as formas de movimentação que um organismo pode assumir, são elas: *movimento padrão*, *afastamento* e *aproximação*.

O *movimento padrão* utilizado pelas presas e predadores é um movimento aleatório e tem o objetivo de fazer com que o organismo percorra o ambiente a fim de encontrar recursos e parceiros sexuais.

O *movimento padrão* é o movimento utilizado quando um organismo não é afetado por um fator externo, sejam parceiros, alvos ou ameaças. Esse movimento é definido com o auxílio do parâmetro *área de deslocamento* (A_x , seja $x = ps$ ou pd).

A *área de deslocamento* é definida como uma coroa circular ao redor da presa ou predador, de acordo com a Figura 3.13. Os valores de r e R definem as fronteiras internas e externas dessa coroa circular. Sendo assim, se um organismo está posicionado em (a,b) no *grid*, a *área de deslocamento* é composta por todos os pontos (x,y) , tal que,

$$r \leq \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} \leq R$$

Com a *área de deslocamento* definida, é escolhido aleatoriamente então um *foco de deslocamento* (F). Esse ponto passa a ser o destino do indivíduo para onde ele se deslocará.

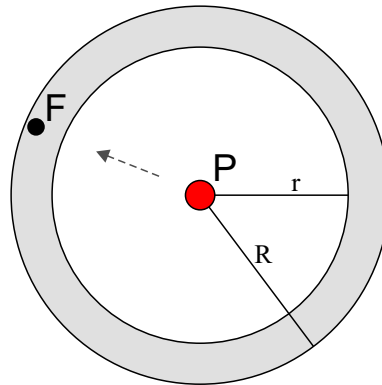


Figura 3.13: Ilustração da escolha do *foco de deslocamento* (F) dentro da *área de deslocamento* (área cinza) definida pelos raios r e R que formam círculos concêntricos na posição do indivíduo.

Após definido o *foco de deslocamento*, o indivíduo aproxima-se dele célula a célula e, quando o indivíduo o atinge, um novo ponto de interesse é escolhido aleatoriamente a partir da sua posição atual. Esse processo de escolha do *foco de deslocamento* e aproximação do organismo é repetido até que o movimento dele seja influenciado por um fator externo, finalizando seu *movimento padrão* e dando início ao movimento de *afastamento ou aproximação*. A Figura 3.14 mostra 3 (três) iterações desse processo, destacando o sorteio sucessivo do foco de interesse.

É importante ressaltar que nem sempre o indivíduo atingirá o *foco de deslocamento*, visto que o movimento do indivíduo pode ser interrompido por um fator externo (parceiros, alvos ou ameaças), como foi dito anteriormente.

A Figura 3.15 mostra uma sequência de deslocamento mais longa, destacando o movimento padrão característico de um ser.

Quando uma presa ou predador está fértil e encontra outro indivíduo também fértil do mesmo tipo, mas de sexo diferente em seu *campo de visão de reprodução*, o organismo

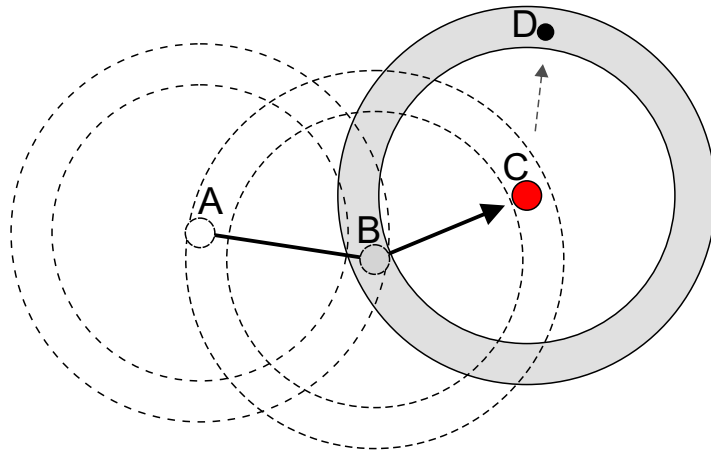


Figura 3.14: Ilustração de 3 (três) iterações. O organismo (círculo vermelho) posicionado em A, sorteou e seguiu em direção ao ponto B, ao chegar no ponto B, sorteou a posição do ponto C e seguiu até ele. A região cinza é a coroa circular onde é sorteada a posição do próximo ponto (ou *foco de deslocamento*), representado na figura como o ponto D.

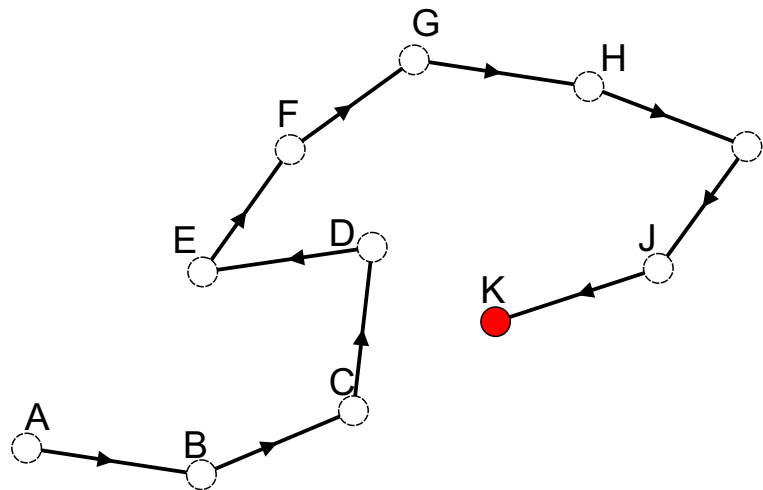


Figura 3.15: Exemplo de movimentação de um indivíduo (círculo vermelho) sem a presença de ameaças, parceiros ou alvos (utilizando o *movimento padrão*). No exemplo da figura, é possível observar o caminho que o indivíduo traçou aleatoriamente através da escolha de *focos de deslocamento* consecutivos.

começa a se aproximar do seu parceiro a fim de procriar, ignorando o *movimento padrão*. Um organismo está fértil quando ele está na *categoria 2* ou *3*, não está gestante ou em resguardo, sendo essas últimas condições aplicáveis apenas a organismos de sexo feminino.

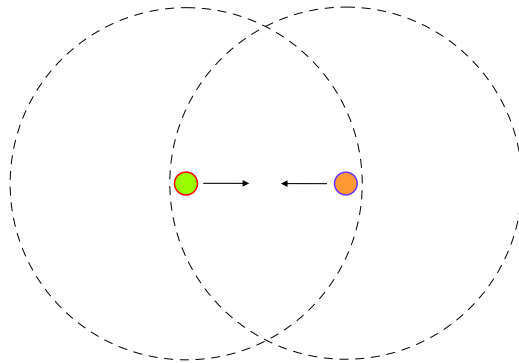


Figura 3.16: Exemplo de um organismo virtual ao identificar, em seu campo de visão, outro indivíduo do *sexo* oposto.

Quando uma presa ou predador está com necessidade de recursos e encontra um alvo em seu *campo de visão de alimentação*, o organismo começa a se aproximar do seu alvo (utilizando o movimento de *aproximação*) a fim de se alimentar dele, ignorando o *movimento padrão* e possíveis parceiros (ilustrado na Figura 3.17). Em outras palavras, a necessidade de consumir recursos tem prioridade sobre a reprodução.

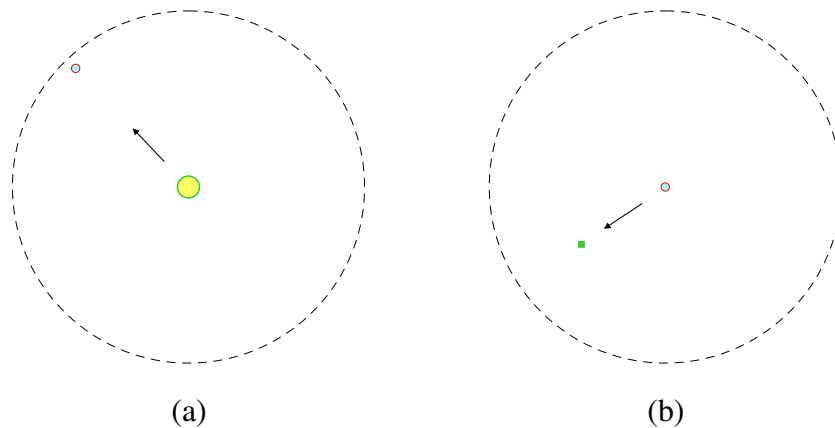


Figura 3.17: Exemplo da detecção de alvos no *campo de visão de alimentação* dos organismos: (a) predador se aproxima de uma presa quando está com fome e a identifica dentro dos limites do seu *campo de visão de alimentação*; e (b) presa se aproxima de um recurso estático quando está com fome e o identifica dentro de seu *campo de visão de alimentação*.

Quando uma presa identifica um predador em seu *campo de visão de alimentação*, inicia o movimento de *afastamento* na tentativa de sobreviver, ignorando o *movimento padrão* e possíveis alvos ou parceiros que também estejam nos *campos de visão de alimentação e reprodução* da presa (ilustrado na Figura 3.18). A fuga tem prioridade sobre a necessidade de recursos e sobre a reprodução.

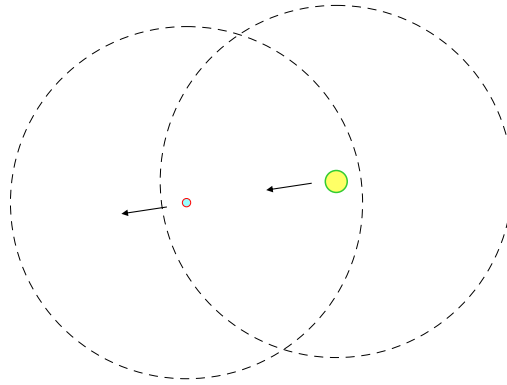


Figura 3.18: Exemplo de uma presa fugindo de um predador ao identificá-lo em seu *campo de visão de alimentação*.

Reprodução

A reprodução é essencial para a propagação da espécie e acontece entre seres férteis. O período fértil ou reprodutivo de um ser vivo se inicia após um período chamado de pré-reprodutivo onde ele cresce e se desenvolve [7]. Ao entrar no período reprodutivo, a capacidade de se reproduzir aumenta gradualmente até que atinja o ápice, e então decresce aos poucos até atingir o mínimo, e então se inicia o período pós-reprodutivo, como foi apresentado na Figura 2.4.

A reprodução entre dois organismos virtuais acontece quando eles são do mesmo tipo, são férteis, são de sexos opostos e estão na mesma posição do *grid*. Com essas condições satisfeitas, uma cópia do código de características (Figura 3.4) do organismo virtual de sexo masculino é armazenada com o organismo virtual do sexo feminino que, a partir de então, entra em estado de gestação. Quando o período de gestação do indivíduo virtual acaba, nasce um novo indivíduo que tem as características combinadas dos organismos pais.

Necessidade de recursos

O atributo *necessidade de recursos* é o tempo entre o momento que o organismo virtual consome um recurso e o momento em que ele morre por ausência dele. Os recursos podem ser múltiplos, mas aqui será tratada apenas a alimentação que implica a fome. Os demais recursos podem ser modelados de maneira análoga.

A cada segundo, o valor da fome é decrementado, quando atingir o valor 0 (zero), o indivíduo morre de fome. O valor inicial da *fome* é $Fome_{máx}$ e quando um organismo se alimenta, a fome dele é restaurada, seja parcialmente ou por completo, dependendo do tipo de alimento. $Fome_{máx}$ define o limite máximo que a fome de um organismo virtual pode assumir. Conforme a Figura 3.19 e a Equação 3.8, $Fome_{máx}$ é a soma do *tempo de fome* (TF_x , onde $x = ps$ ou pd) e *tempo de saciedade* ($Tsac_x$, onde $x = ps$ ou pd).



Figura 3.19: Estrutura da *fome* de um organismo virtual, que pode assumir valores entre 0 e $Fome_{máx}$. Os *tempos de fome* e *saciadeade* somados são iguais a $Fome_{máx}$.

$$Fome_{máx} = Tsac_x + TF_x, x = ps \text{ ou } pd \quad (3.8)$$

Quando um organismo virtual do tipo predador se alimenta de outro do tipo presa, sua fome é restaurado por completo, ou seja, é igualado ao valor de $Fome_{máx}$. O valor da *fome* de uma presa também é restaurada por completo quando ele se alimenta de um recurso alimentar.

Após se alimentar, o organismo virtual fica saciado durante o *tempo de saciadeade*. Mesmo que o organismo identifique alimento em seu *campo de visão de alimentação*, ele não se moverá em direção ao seu alvo pois não estará à procura de alimento.

Quando o *tempo de saciadeade* acaba, o organismo virtual entra no estado de fome e, a partir de então, ele estará à procura de alimento. Se o organismo identificar alimento (recurso) em seu *campo de visão de alimentação*, ele se moverá em direção ao seu alvo. O período de tempo entre o momento em que o indivíduo entra em estado de fome e sua morte por desnutrição é denominado *tempo de fome*.

Tabela 3.8: Atributos da *necessidade de recursos*.

Parâmetro	Descrição
$Tsac_{ps}$	Tempo de saciadeade de fome das presas
$Tsac_{pd}$	Tempo de saciadeade de fome dos predadores
TF_{ps}	Tempo de fome das presas
TF_{pd}	Tempo de fome dos predadores

O Apêndice B.4 sintetiza os comportamentos das presas e predadores. Na Seção 3.2 será apresentada a aplicação do modelo proposto ao estudo dos lebistes.

3.2 APLICAÇÃO DO MODELO AO ESTUDO DOS LEBISTES

Nesta seção, o modelo geral será aplicado ao caso particular dos lebistes, estudado por Endler. Como está representado na Figura 3.20, os predadores se alimentam dos lebistes que, por sua vez, se alimentam de outros recursos. Os três elementos do modelo (predador, lebiste e os recursos dos lebistes) estão inseridos no ambiente.

Assim como no modelo geral apresentado na Seção 3.1, a aplicação ao caso dos lebistes também requer um gerente, que não será descrito novamente nesta seção pois possui as mesmas propriedades descritas na Seção 3.1.1. O restante das definições referentes às presas

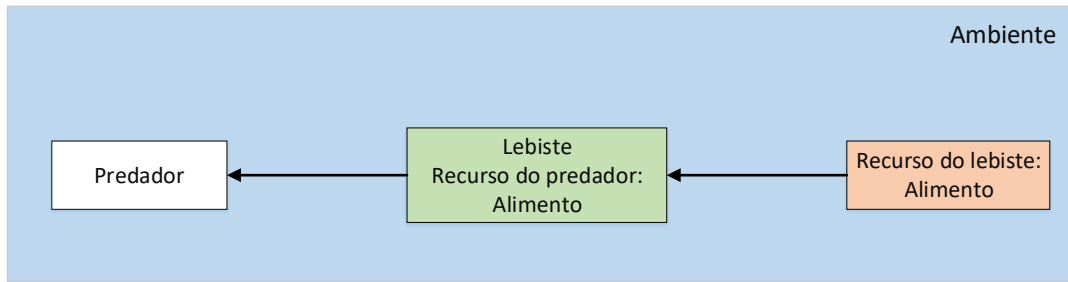


Figura 3.20: Elementos do sistema presa-predador que envolve os lebiste.

e aos predadores podem ser observados no modelo geral. Nesse sentido, não se faz necessária uma nova descrição dos mesmos elementos.

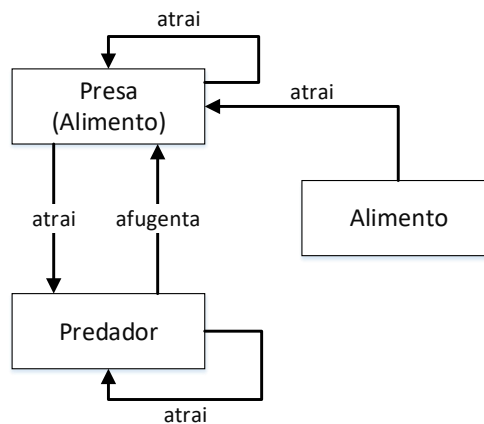


Figura 3.21: Relação entre os elementos constituintes do modelo lebiste.

A Figura 3.21, porém, reforça alguns comportamentos fundamentais, além da alimentação, que são a fuga das presas quando se sentem ameaçadas e a atração para procriação.

O ambiente tem especificações para essa aplicação e serão descritas na Seção 3.2.1.

3.2.1 Ambiente

O ambiente tem um formato retangular e é composto por células que formam um *grid*, como pode ser observado na Figura 3.22.

O atributo *dimensão* do ambiente é composto pela quantidade de células horizontais e verticais que definem seu tamanho. A *cor* é o conjunto dos componentes R , G e B que formam uma cor no espaço de cores RGB (*Red*, *Green*, *Blue*) [96]. O atributo *cor* dos demais elementos do modelo proposto são representados da mesma forma.

Visto que a característica alvo que se deseja simular é a camuflagem, um dos comportamentos do ambiente é a mudança de cor. Esse comportamento é inspirado na ideia de que o ambiente é mutável e é alterado aos poucos com o passar do tempo, dessa forma, os valores de R , G e B do ambiente são reajustados durante a simulação.

Utilizando esse recurso, os organismos que estão camuflados no ambiente poderão não

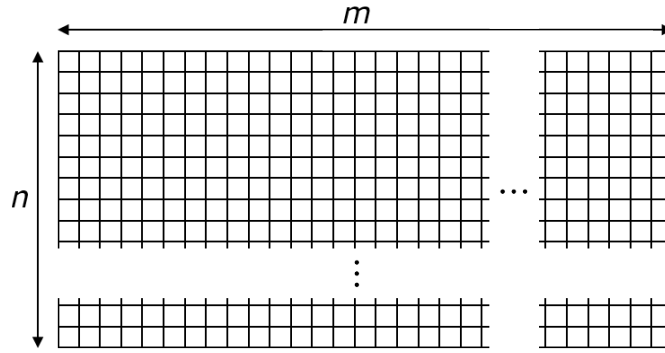


Figura 3.22: Células do ambiente de simulação

estar camuflados quando a *cor* do ambiente muda. Com isso, torna-se necessário a constante evolução da *cor* dos indivíduos para acompanhar a variação da *cor* do ambiente.

Quando há o comportamento de mudança de *cor* do ambiente, é definido um intervalo de variação em função da *cor inicial*, da *cor mínima* e da *cor máxima*. Como por exemplo, na Figura 3.23, a definição do intervalo de variação da *cor* para uma única componente da *cor* (*R*, *G* ou *B*), dada uma *cor inicial*. As três componentes se modificam simultaneamente e de maneira independente.

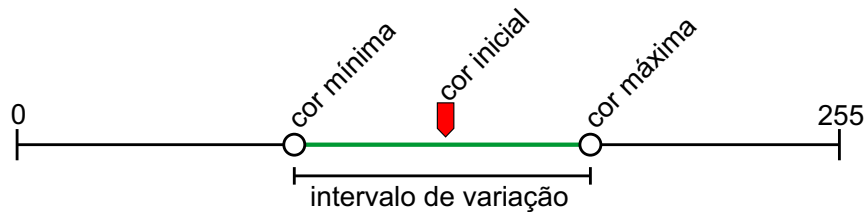


Figura 3.23: Um componente da *cor* (*R*, *G* ou *B*) varia dentro de um intervalo (intervalo de variação) que é calculado a partir dos valores dos atributos *cor mínima* e *cor máxima* ao redor do valor da *cor inicial* do ambiente.

Após definida uma *cor alvo* dentro do intervalo de variação de *cor*, a *cor atual* se aproxima da *cor alvo* a uma intensidade (*IMA*) a cada período (*PMA*), que devem ser baixos para que não ocorram mudanças drásticas na *cor* do ambiente em um curto período de tempo.

No instante t_0 , uma *cor alvo* é sorteada dentro do intervalo de variação, como ilustrado na Figura 3.24 (a). Nesse caso, a *cor atual* é igual a *cor inicial*. No instante $t_0 + PMA$, a *cor atual* é atualizada para o valor $cor\ inicial + IMA$, conforme a Figura 3.24 (b).

O processo é repetido até que a *cor atual* seja igual a *cor alvo*. Em seguida, uma nova *cor alvo* é sorteada e o processo de mudança de *cor* é reiniciado. Isso garante a constante mudança de *cor* do ambiente.

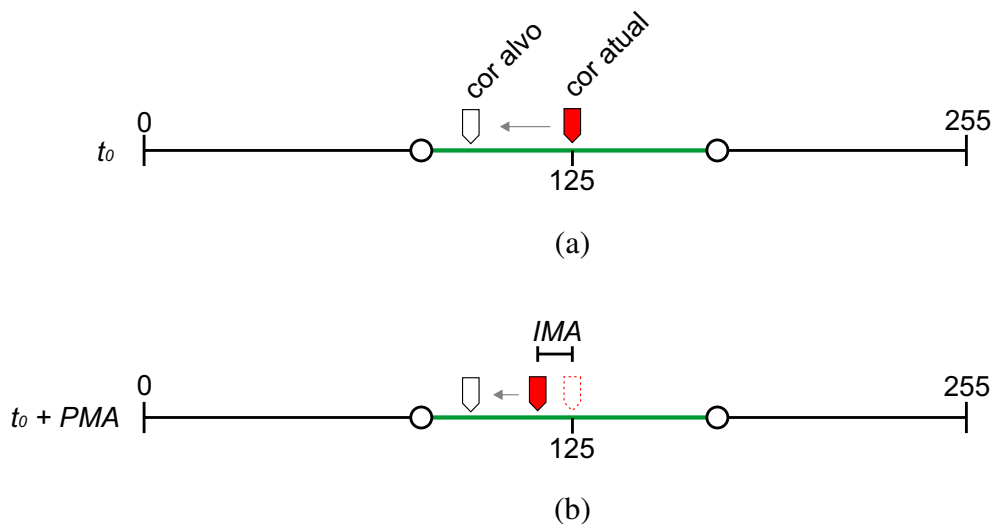


Figura 3.24: Exemplo de mudança de *cor* do ambiente que possui uma *cor inicial* = 125. Um componente da *cor* (*R*, *G* ou *B*) se aproxima da *cor alvo* a intervalos de cor (*IMA*) a cada período de tempo *PMA*. O processo se repete para os três componentes.

3.3 APLICAÇÃO DO MODELO A UM CENÁRIO FICTÍCIO

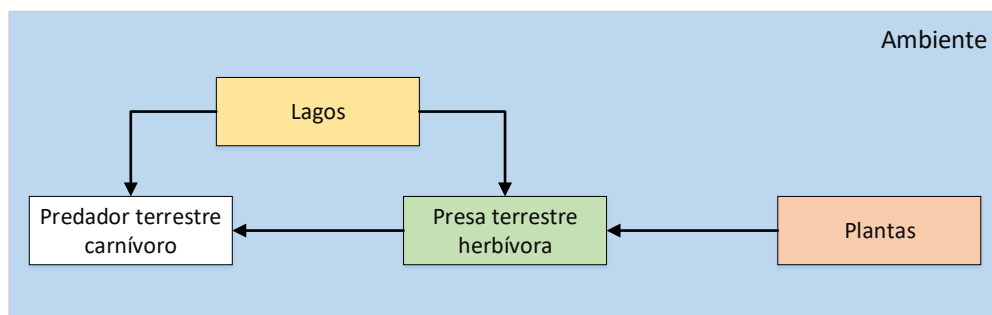


Figura 3.25: Elementos do sistema presa-predador fictício. As plantas são recursos para presas, as presas são recursos para predadores e os lagos são recursos compartilhados para presas e predadores.

A aplicação do modelo geral a um cenário fictício é mostrada na Figura 3.25. Nesta aplicação, é simulado um ambiente com espécies terrestres de presas e predadores, onde as presas representam uma espécie herbívora que possui plantas como recurso alimentar ao mesmo tempo que são recursos alimentares dos predadores. Além disso, há lagos que representam recursos compartilhados por ambas as espécies. Os lagos representam a necessidade das espécies de consumir água.

Nesse modelo são levados em consideração apenas um recurso alimentar para cada espécie (plantas para presas e presas para predadores) e um recurso compartilhado (lagos para presas e predadores). A Figura 3.26 detalha um pouco mais a relação entre os elementos constituintes do cenário fictício proposto.

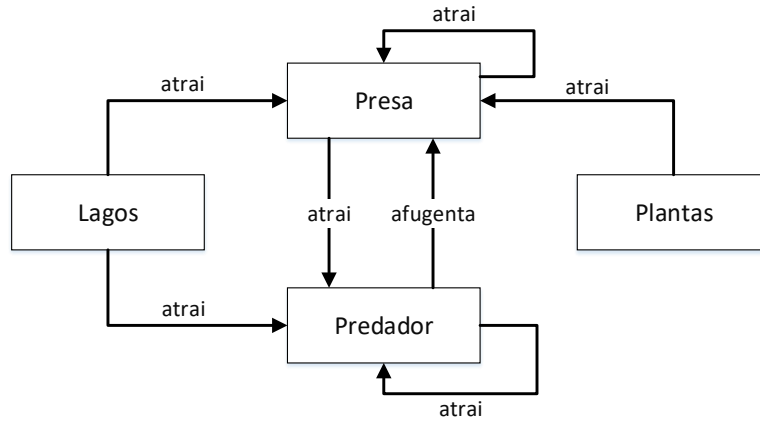


Figura 3.26: Relação entre os elementos constituintes do cenário fictício.

Dessa forma, são apresentadas a seguir (Seções 3.3.1 e 3.3.2) as modelagens dos recursos plantas e lagos, visto que são exclusivos desse modelo fictício e não foram apresentados anteriormente.

3.3.1 Lagos

Os lagos são uma fonte de recurso para as presas e para os predadores quando estes representam espécies terrestres e necessitam de hidratação. Possuem o atributo *cor* que, após definido, permanece constante e é o mesmo para todos os lagos. A *posição* é composta pelas coordenadas x e y do lago, que definem a coluna e a linha onde se encontram no *grid*.

Os lagos têm a propriedade de aumentar e diminuir seu *volume* de acordo com épocas, simulando o nível variável da água em lagos devido à evaporação (diminuição do volume de água) e da precipitação (aumento do volume de água dos lagos) [97, 98]. É modelado por uma função senoidal de período T_{osc} e amplitude variando entre o valor de volume mínimo (VL_{min}) e volume máximo ($VL_{máx}$) para definir o *volume* atual de cada lago.

A alteração no volume de água dos lagos é dada pelas Equações 3.9, 3.10 e 3.11.

$$m = \frac{VL_{máx} + VL_{min}}{2} \quad (3.9)$$

$$a = VL_{máx} - m \quad (3.10)$$

$$F(t) = a \times \sin\left(\frac{2\pi}{T_{osc}} \times t\right) + m = \textit{volume} \quad (3.11)$$

onde, $F(t)$ é a função de oscilação de um lago, m é a média da função, a é a amplitude e T_{osc} é o período de oscilação dado em segundos. A cada oscilação, os lagos aumentam até o limite máximo ($VL_{máx}$) e diminuem até o limite mínimo (VL_{min}).

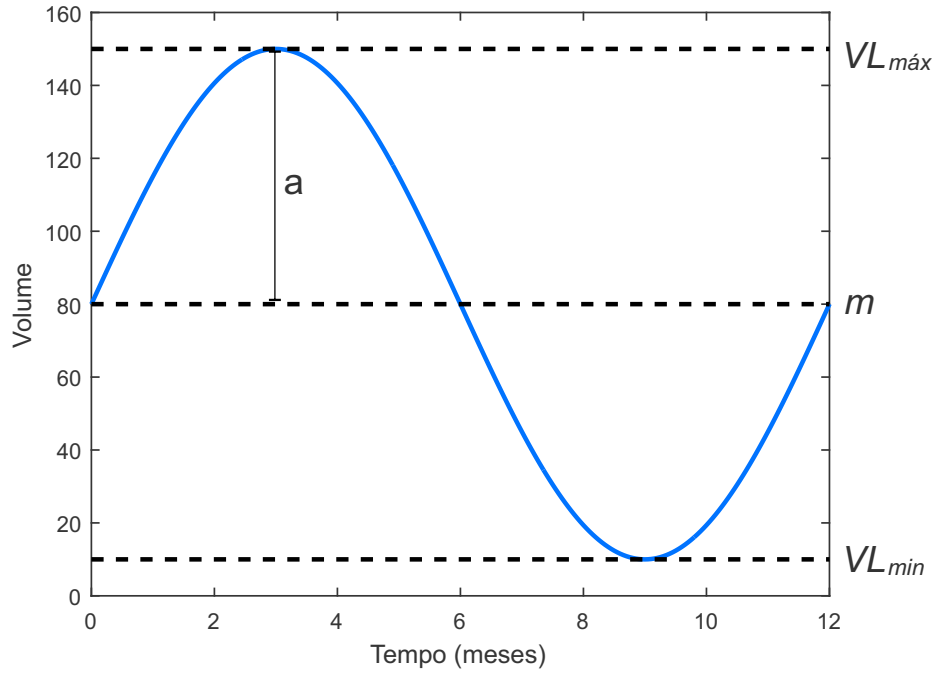


Figura 3.27: Exemplo da função senoidal que modela a oscilação de um lago.

Na Figura 3.27 é possível observar um exemplo da função de oscilação de um lago em que o período de oscilação (T_{osc}) é 10 segundos, o volume mínimo do lago (VL_{min}) é 10, o volume máximo ($VL_{máx}$) é 150 e m é 80.

Tabela 3.9: Atributos dos lagos.

Informação	Descrição
<i>cor</i>	Componentes <i>R</i> , <i>G</i> e <i>B</i> da cor do lago
<i>posição</i>	Coordenadas <i>x</i> e <i>y</i> da posição do lago
<i>volume</i>	Volume atual do lago
T_{osc}	Tempo de oscilação do lago
VL_{min}	Volume mínimo do lago
$VL_{máx}$	Volume máximo do lago

3.3.2 Plantas

As plantas representam o recurso alimentar para as presas. As plantas contam com o atributo *cor*, que assim como a *cor* dos lagos, permanece constante ao longo da simulação e é o mesmo valor para todas as plantas. A *posição* é composta pelas coordenadas *x* e *y* da planta, que definem a coluna e a linha onde se encontra no *grid*.

As plantas são representadas por submatrizes quadradas localizadas na matriz do ambiente e podem ser de dois tamanhos: grandes ou pequenas. O atributo *tamanho* indica a dimensão da submatriz que representa a planta.

Quando uma presa se alimenta de uma planta, a planta morre e desaparece do ambiente

por um período de tempo (*tempo de morte da planta* - *TMP*). Após decorrido esse período, ela renasce na mesma *posição* com o mesmo *tamanho*.

Tabela 3.10: Atributos das plantas.

Informação	Descrição
<i>cor</i>	Componentes <i>R</i> , <i>G</i> e <i>B</i> da cor da planta
<i>posição</i>	Coordenadas <i>x</i> e <i>y</i> da posição da planta
<i>tamanho</i>	Tamanho da planta
<i>TMP</i>	Tempo de morte da planta

O Apêndice B.3 sintetiza os comportamentos das plantas. A seguir, na Seção 3.4 será apresentada a implementação de uma ferramenta computacional com base no modelo proposto apresentado.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Com a finalidade de validar o modelo apresentado na Seção 3.1, foi desenvolvido um *software* de simulação. Os detalhes sobre a implementação do *software*, desenvolvido com base no modelo proposto, aqui denominado de Demiourgos¹, serão apresentados na Seção 3.4.1.

O simulador foi concebido de forma a poder ser configurado para que se adapte à diversas aplicações, dentre elas estão incluídas a aplicação ao estudo dos lebetes (apresentado na Seção 3.2) e ao cenário fictício (apresentado na Seção 3.3).

3.4.1 Demiourgos: *software* de simulação

O Demiourgos é um simulador de vida artificial que possibilita a realização de experimentos que permitem extrair resultados a partir de observações características de modelos complexos de ecossistemas reais onde se observa a relação presa-predador.

O sistema foi implementado em linguagem de programação C++ [99, 100] e utiliza o paradigma de programação concorrente para melhor simular a interação não-linear competitiva entre os indivíduos virtuais [101, 102]. Ao se utilizar programação concorrente, é possível simular a independência de cada organismo, mantendo a interação entre eles mais realista.

Utilizou-se também a biblioteca gráfica *WinBGIm* que possibilita a criação de uma interface gráfica e elementos geométricos bidimensionais [103]. É importante ressaltar que o uso da biblioteca gráfica é dispensável do ponto de vista das simulações, uma vez que os elementos gráficos não influenciam no comportamento dos organismos, tampouco no resultado das simulações. Contudo, a biblioteca gráfica propicia a visualização passo a passo da

¹Do grego, “trabalhador para o povo”. No pensamento de Platão, trata-se de um artesão responsável por dar forma e manter o universo físico.

simulação, tornando-a mais interessante.

A fim de tornar o simulador mais dinâmico e aplicável a diferentes cenários de simulação, os parâmetros dos elementos do modelo podem ser ajustados (Apêndice A). Esses parâmetros são armazenados em um arquivo de configuração.

Quando o simulador é executado, as informações contidas no arquivo de configuração são lidas e uma simulação com as características definidas neste arquivo é gerada (Figura 3.28). Sendo assim, para alterar os parâmetros de entrada do simulador, é necessário alterar o arquivo de configuração.

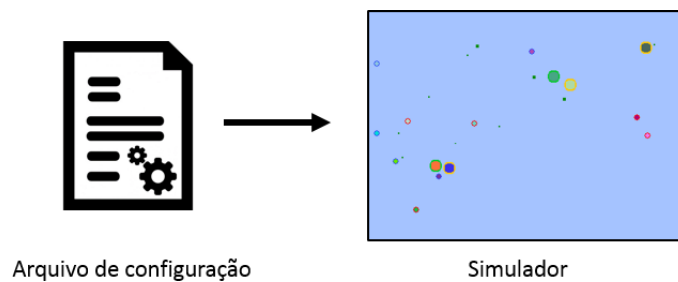


Figura 3.28: Um arquivo de configuração contém parâmetros de entrada do *software* simulador.

O arquivo de configuração pode ser alterado por qualquer editor de texto, contudo, para facilitar a configuração da simulação, foi implementado uma interface auxiliar que possibilita a configuração dos parâmetros do simulador. Conforme ilustrado na Figura 3.29, os parâmetros são ajustados e salvos em um arquivo texto de configuração com o auxílio de uma interface mais amigável.

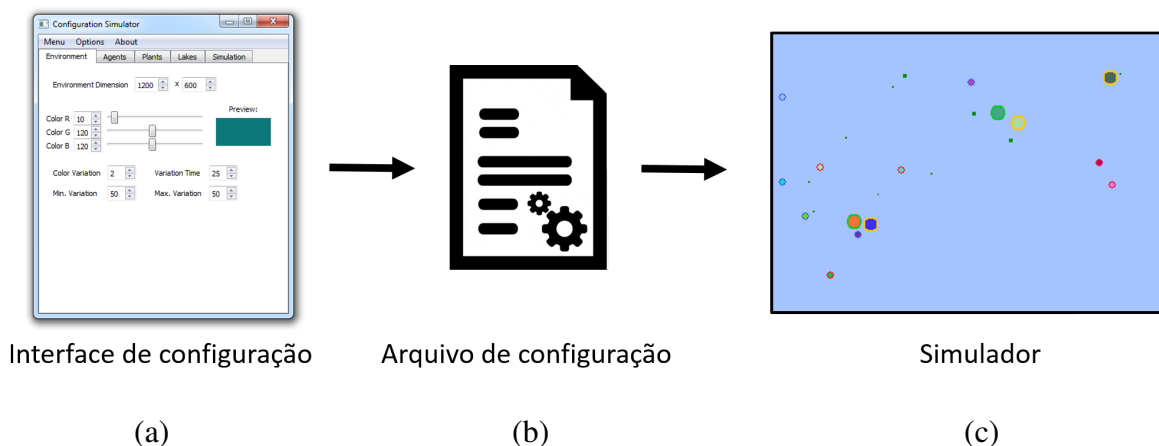


Figura 3.29: Processo de configuração dos parâmetros das simulações: (a) interface de configuração; (b) arquivo de configuração; e (c) *software* Demiourgos. A interface de configuração é apresentada no Apêndice C.

Os parâmetros de simulação contidos no arquivo de configuração e uma breve descrição de cada um podem ser vistos nas Tabelas A.1 a A.5 (Apêndice A), que são apresentados

de forma separada para facilitar a localização de parâmetros específicos. Contudo, pertencem ao mesmo arquivo de configuração. De acordo com os parâmetros de configuração, as simulações apresentam comportamentos variáveis, gerando resultados distintos.

Alguns parâmetros de configuração porém, surtem efeito apenas na visualização, não influenciando os comportamentos. Exemplos de parâmetros de efeito exclusivamente gráfico são: tamanho da representação gráfica das presas (T_{ps}) e predadores (T_{ps}); cor das plantas; e cor dos lagos.

Visto que, de acordo com os parâmetros, as simulações têm comportamentos distintos e é importante armazenar os dados de simulação produzidos durante as execuções do simulador. Como resultado de cada simulação, um relatório com dados para análises posteriores é gerado (Figura 3.30). Os relatórios são arquivos de texto gerados durante as simulações e são armazenados em um diretório próprio que contém os relatórios das simulações passadas.

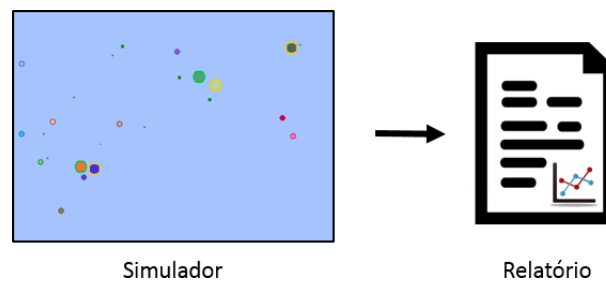


Figura 3.30: Processo de geração de relatório da simulação.

As informações que são armazenadas no relatório podem ser vistas na Tabela 3.11. A cada tempo de atualização do relatório (TAR) dado em segundos de simulação, as informações são anexadas ao relatório. Dessa forma, em um relatório, ficam armazenadas as informações sobre o processo de simulação, com atualizações a intervalos de TAR segundos. Através dos valores armazenados, é possível observar a evolução das presas e predadores no que tange ao número de indivíduos, às componentes que formam suas cores médias deles, aos campos de visão médios e às velocidades médias.

O gerente tem a função de administrar o início e andamento da simulação. Na Seção 3.4.1.1 serão descritas detalhadamente todas as atribuições do gerente.

3.4.1.1 Gerente

O gerente administra elementos gerais da simulação e é um elemento abstrato, ou seja, não tem representação gráfica na simulação. Ele prepara o ambiente de simulação antes que a simulação se inicie (criando os outros elementos de simulação: ambiente, presas, predadores, plantas e lagos), contabiliza o tempo de simulação, cria e gerencia a interface gráfica, gerencia os recursos computacionais (memória e processamento), configura cada simulação de acordo com as informações determinadas pelo usuário e cria no decorrer da simulação um arquivo de relatório com informações atualizadas.

Tabela 3.11: Informações de simulação que são armazenadas nos relatórios.

Informação	Descrição
$QPSM$	Quantidade de presas macho vivas
$QPSF$	Quantidade de presas fêmea vivas
$QPDM$	Quantidade de predadores macho vivas
$QPDF$	Quantidade de predadores fêmea vivas
MCR_{ps}	Média dos componentes R das presas vivas
MCG_{ps}	Média dos componentes G das presas vivas
MCB_{ps}	Média dos componentes B das presas vivas
MCR_{pd}	Média dos componentes R dos predadores vivos
MCG_{pd}	Média dos componentes G dos predadores vivos
MCB_{pd}	Média dos componentes B dos predadores vivos
MV_{ps}	Média das velocidades das presas vivas
MV_{pd}	Média das velocidades dos predadores vivos
MCA_{ps}	Média dos campos de visão de alimentação das presas vivas
MCA_{pd}	Média dos campos de visão de alimentação dos predadores vivos
$MWSAF_{ps}$	Média dos campos de visão de reprodução das presas vivas
$MWSAF_{pd}$	Média dos campos de visão de reprodução dos predadores vivos

As funções do gerente podem ser divididas em dois grupos: funções executadas na inicialização da simulação e as funções executadas durante a simulação, descritas no Apêndice B.2 e sintetizadas na Figura 3.31. A seguir serão descritos estes dois conjuntos de funções.

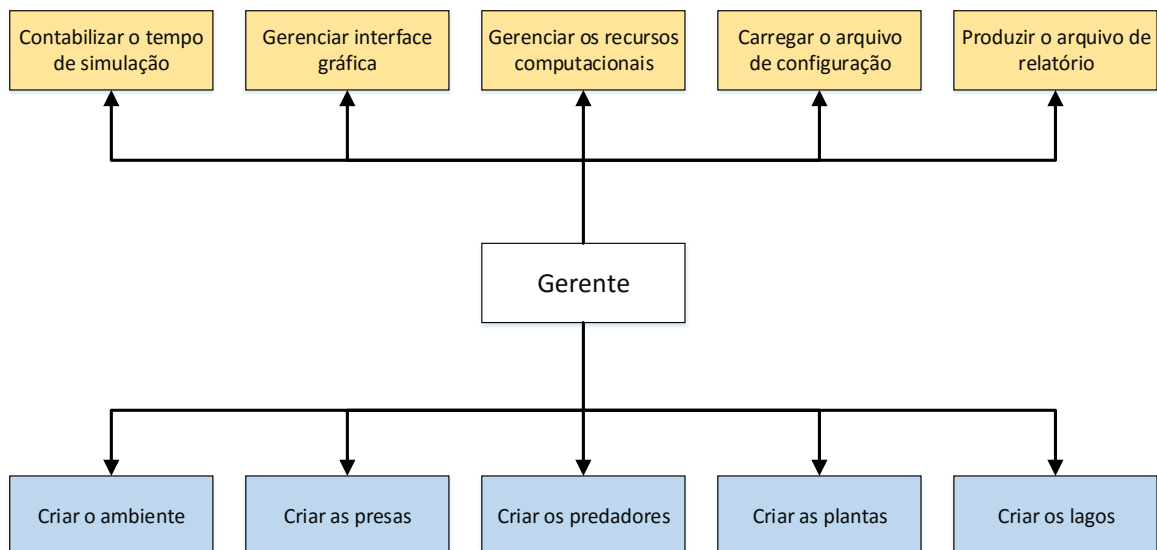


Figura 3.31: Funções do gerente. Os retângulos de cor amarela são funções executadas durante a simulação e os retângulos de cor azul são funções executadas na inicialização da simulação.

Funções de inicialização da simulação

No começo da simulação, o gerente abre o arquivo de configuração e inicia os atributos dos elementos de simulação com os valores lá contidos. Ele cria o relatório que armazenará

as informações sobre a simulação. Baseado nas informações lidas do arquivo de configuração, o gerente cria o ambiente de simulação com as dimensões e cores pré-definidas. Em seguida, os lagos e as plantas são criados e posicionados aleatoriamente ao longo do ambiente. Além disso, o gerente cria os indivíduos (presa e predadores) e os posiciona aleatoriamente no ambiente. Cada organismo da população inicial (indivíduos criados no início da simulação) tem a *idade*, *campo de visão de alimentação*, *campo de visão de reprodução*, *sexo* e *velocidade* sorteados pelo gerente. Logo, no início da simulação, alguns indivíduos já poderão ter idade suficiente para procriar e gerar descendentes. Após a inicialização, o gerente acompanha o processo de simulação. As ações realizadas pelo gerente durante a simulação são descritas a seguir.

Funções de monitoramento da simulação

Uma vez inicializada a simulação, o gerente observa e controla os elementos da simulação: ambiente, plantas e lagos. As presas e predadores têm comportamentos independentes e autônomos. O gerente controla o tempo, registra informações no relatório, verifica o tempo de vida dos organismos e atualiza dos elementos gráficos de simulação (ele “desenha” os elementos) de acordo com suas características.

O gerente também é responsável pela administração da memória e do processamento do simulador. Quando um novo organismo é criado, o gerente aloca memória do computador e quando um organismo é morto, seja por predação ou por *idade máxima* atingida (senescência), o gerente libera a memória alocada no momento de sua criação. O gerente também define alta prioridade de processamento para a execução da simulação sobre outros programas, dedicando, assim, maior processamento para o simulador, visto que este demanda muitos recursos, principalmente quando está simulando uma grande quantidade de indivíduos.

Outra função do gerente é calcular os valores de MCR_{ps} , MCG_{ps} , MCB_{ps} , MCR_{pd} , MCG_{pd} e MCB_{pd} descritos na Tabela 3.11 e armazená-los em relatório durante a simulação a intervalos de tempo de TAR segundos. No entanto, este é um parâmetro que define a amostragem temporal da simulação e pode ser ajustado conforme a necessidade.

3.4.1.2 Ambiente

No Demiourgos, cada célula do ambiente é representada por um *pixel* na tela. A cor de cada *pixel* é formada por três valores, como é ilustrado na Figura 3.32.

Nas simulações apresentadas no Capítulo 4 e no Apêndice D, as dimensões do ambiente foram definidas por 720 x 576 *pixels*.

R: 202 G: 177 B: 146	R: 231 G: 208 B: 177	R: 239 G: 215 B: 187	R: 228 G: 207 B: 178	R: 224 G: 203 B: 172	R: 217 G: 196 B: 165	R: 220 G: 200 B: 167
R: 203 G: 176 B: 147	R: 237 G: 213 B: 185	R: 235 G: 214 B: 185	R: 237 G: 216 B: 187	R: 223 G: 202 B: 173	R: 209 G: 188 B: 157	R: 223 G: 200 B: 168
R: 205 G: 178 B: 149	R: 237 G: 213 B: 185	R: 235 G: 214 B: 185	R: 235 G: 214 B: 185	R: 221 G: 202 B: 172	R: 216 G: 195 B: 164	R: 222 G: 199 B: 167
R: 209 G: 182 B: 155	R: 240 G: 216 B: 188	R: 234 G: 213 B: 184	R: 232 G: 213 B: 183	R: 218 G: 199 B: 167	R: 219 G: 198 B: 167	R: 217 G: 194 B: 163

Figura 3.32: Uma matriz de *pixels*.

3.4.1.3 Lagos

Os lagos são representados graficamente por círculos azuis sem borda de tamanhos diversos. Na Figura 3.33 pode-se observar a representação gráfica da variação do volume de um lago com o passar do tempo.

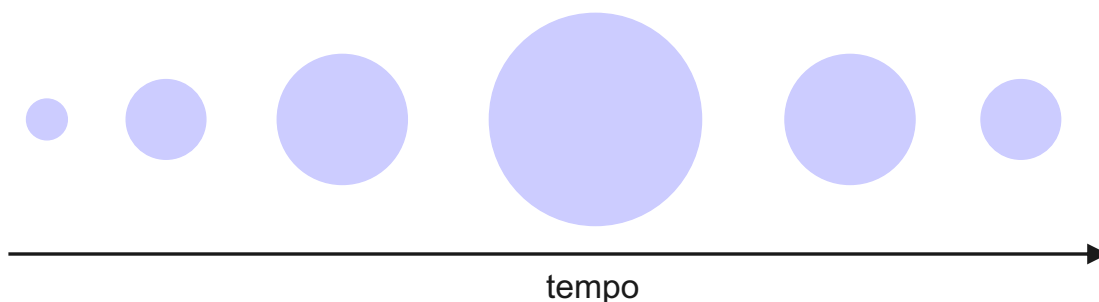


Figura 3.33: Representação gráfica da variação do volume de um lago ao longo do tempo.

No decorrer da simulação, o tamanho dos lagos oscila. Cada oscilação significa que o lago aumentou até seu limite máximo ($RL_{máx}$), depois diminuiu até o limite de tamanho mínimo ($RL_{mín}$) e aumentou novamente até o seu tamanho inicial.

3.4.1.4 Plantas

As plantas simuladas podem ser de dois tamanhos diferentes: plantas pequenas (os lados do quadrado com tamanho de 2 *pixels*) e plantas grandes (os lados do quadrado com tamanho de 4 *pixels*). As plantas são representadas graficamente por quadrados de cor verde, como pode ser observado na Figura 3.34.

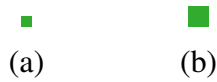


Figura 3.34: Representação visual das plantas na simulação: (a) planta de tamanho pequeno; e (b) planta de tamanho grande.

3.4.1.5 Presas e predadores

Por motivos de simplicidade e melhoria no desempenho computacional do simulador, as presas e predadores são representados graficamente por círculos com bordas de cores diferentes. As cores das bordas e o diâmetro dos círculos que representam os organismos virtuais são úteis para identificar graficamente o sexo e o tipo dele. As diferentes cores de borda dos indivíduos virtuais são descritos na Figura 3.35

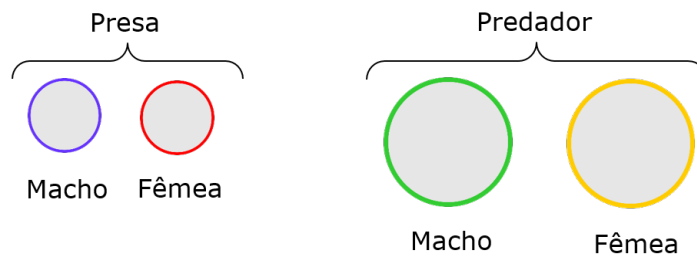


Figura 3.35: Representação visual das presas e predadores.

As presas são representadas graficamente por círculos menores e os predadores por círculos maiores. As presas do sexo masculino são representados por círculos com bordas azuis, as do sexo feminino por círculos com bordas vermelhas. Os predadores do sexo masculino são representados por círculos com bordas verdes e os predadores do sexo feminino por círculos com bordas amarelas. A cor de dentro dos círculos é o atributo *cor* de cada indivíduo. É importante ressaltar que a borda do círculo apenas indica o sexo e o tipo de organismo e não é levada em consideração na camuflagem do indivíduo.

O *tamanho* das presas e predadores no simulador foram definidos como 4 *pixels* para as presas e 8 para os predadores (incluindo a borda). Contudo, esses valores podem ser configurados no arquivo de configurações.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta Seção, serão descritos, apresentados e discutidos os experimentos realizados utilizando o software de simulação Demiourgos.

Os experimentos foram divididos em 8 (oito) classes de experimentos, denominadas I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII, respectivamente. Para cada classe de experimentos, foram definidos parâmetros de configuração diferentes com o propósito de se obter resultados relativos, formando cenários diferentes.

Com exceção da classe de experimentos VIII, as classes simulam a aplicação do modelo proposto ao estudo de caso dos lebetes (Seção 3.2). A classe de experimentos VIII simula a aplicação do modelo proposto a um cenário fictício (Seção 3.3).

Exceto para os experimentos das classes IV e V, foram realizados 4 (quatro) experimentos utilizando as configurações definidas em cada classe. Nos experimentos IV e V, surgiu a necessidade de se realizar 8 (oito) experimentos por classe para tornar mais clara a comparação entre eles no que tange às consequências da aplicação da mutação nos organismos virtuais.

As classes se diferem principalmente porque possuem características distintas. As características que variam entre as classes podem ser habilitadas ou desabilitadas e são chamadas de módulos. A Tabela 4.1 mostra os conjuntos de módulos que foram habilitados para cada classe de experimento.

Tabela 4.1: Tabela com módulos que são habilitados e desabilitados em cada classe de experimento. A descrição dos parâmetros de módulos se encontram na Tabela A.1.

Classes	Recursos das presas	Fome das presas	Mutação	Fuga das presas	Camuflagem dos predadores	Recursos compartilhados
I	Não	Não	Não	Não	Não	Não
II	Não	Não	Não	Não	Não	Não
III	Não	Não	Não	Não	Não	Não
IV	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
V	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
VI	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
VII	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
VIII	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Cada experimento é uma simulação e pertence exclusivamente a uma dos oito classes. De cada experimento, são gerados seis subfiguras, identificadas por (a), (b), (c), (d), (e) e (f). As informações salvas nos arquivos de relatório e que são mostradas nas figuras de resultado estão descritas na Tabela 3.11 (pág. 55). A organização das subfiguras que apresentam essas informações são organizadas da seguinte forma: as subfiguras (a) e (b) mostram os estados iniciais e finais das simulações; as subfiguras (c) sintetizam a evolução da camuflagem das presas; as subfiguras (d) mostram a evolução do número de presas e predadores de ambos os

sexos ao longo do tempo; as subfiguras (e) mostram a evolução da média da velocidade; e as subfiguras (f) ilustram a evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução para presas e predadores.

Em cada seção que está relacionada às classes de experimentos, será apresentado o resultado de apenas um experimento e os demais se encontram nos Apêndices D.

Para cada experimento, variam-se alguns parâmetros iniciais. A Tabela 4.2 apresenta suas descrições.

Tabela 4.2: Parâmetros variáveis para cada experimento.

Parâmetro	Descrição
CA_r	Componente R da cor do ambiente
CA_g	Componente G da cor do ambiente
CA_b	Componente B da cor do ambiente
$QIPSM$	Quantidade inicial de presas macho
$QIPSF$	Quantidade inicial de presas fêmea
$QIPDM$	Quantidade inicial de predadores macho
$QIPDF$	Quantidade inicial de predadores fêmea

4.0.2 Classe de experimento I

Nessa classe de experimento é possível observar a extinção dos predadores e a prevalência das presas, além da evolução da camuflagem dos seres virtuais. O comportamento típico dessa classe é descrito a seguir.

Inicialmente, a população de predadores cresce e a população de presas diminui. Isso se dá pelo fato de que a cor dos indivíduos da população inicial é aleatória e apenas uma pequena porção dos organismos está camuflada. Nesse sentido, os predadores detectam facilmente as presas e se alimentam delas. A população de predadores cresce, mesmo que de forma sutil devido à reprodução que acontece paralela à predação.

A população de presas diminui até que restam apenas indivíduos camuflados, porque estes não podem ser vistos por predadores, mesmo que estejam dentro de seus campos de visão. Logo, impossível para um predador identificar uma presa e os predadores vão aos poucos morrendo de fome. Enquanto isso, as presas se reproduzem e passam suas características para seus descendentes. Entre elas, está incluída a cor. Logo, as presas nascerão camufladas e, quando chegarem à fase reprodutiva, também gerarão descendentes bem adaptados. A população de presas cresce demasiadamente por não haver um limitante como, por exemplo, recursos.

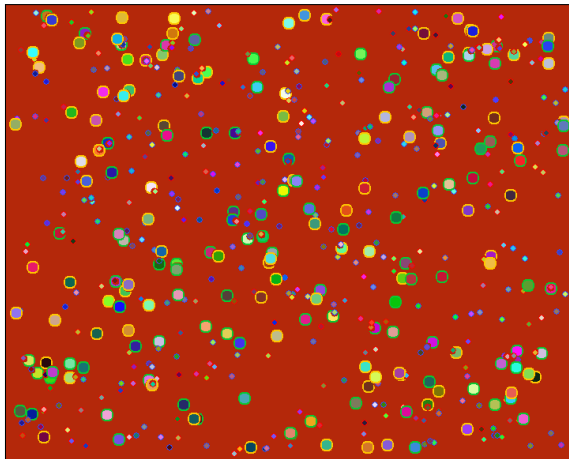
Como pode ser observado na Tabela 4.1, o que caracteriza a classe I de experimentos é o fato de que não foi habilitado nenhum módulo.

A Tabela 4.3 e a Figura 4.1 resumem as configurações dos quatro experimentos realizados

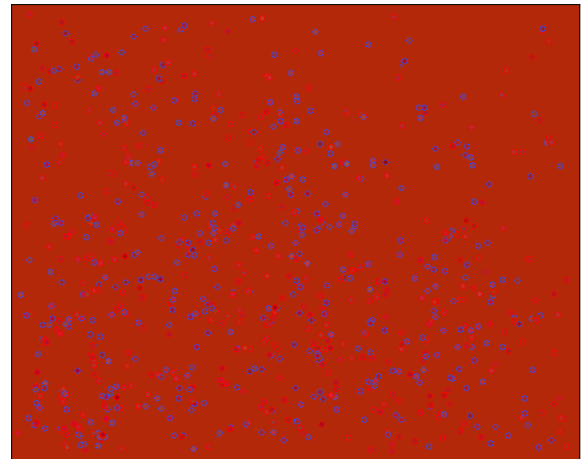
para a classe de experimentos I e os resultados obtidos para o experimento I.2, respectivamente.

Tabela 4.3: Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe I.

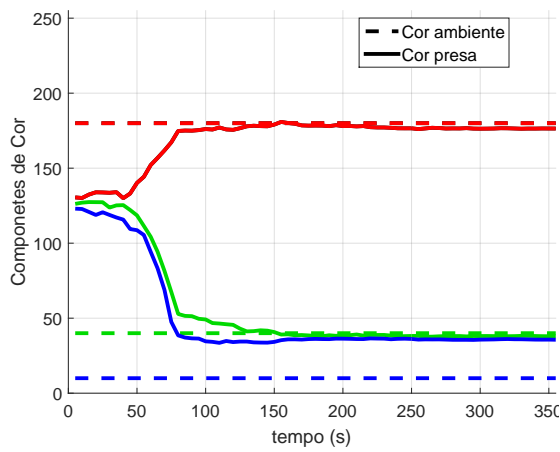
Exp.	Cor do ambiente			Quant. presas iniciais		Quant. pred. iniciais	
	CA_r	CA_g	CA_b	$QIPSM$	$QIPSF$	$QIPDM$	$QIPDF$
I.1.	50	140	250	100	100	100	100
I.2.	180	40	10	200	200	100	100
I.3.	50	240	110	200	200	50	50
I.4.	240	140	10	150	150	30	30



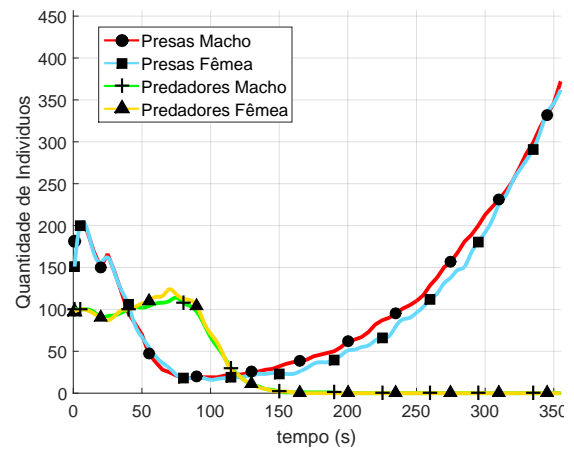
(a)



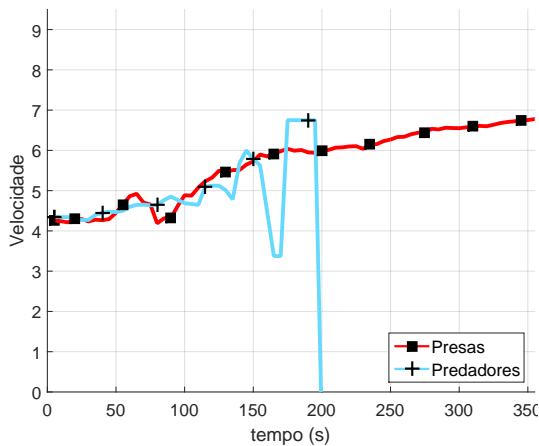
(b)



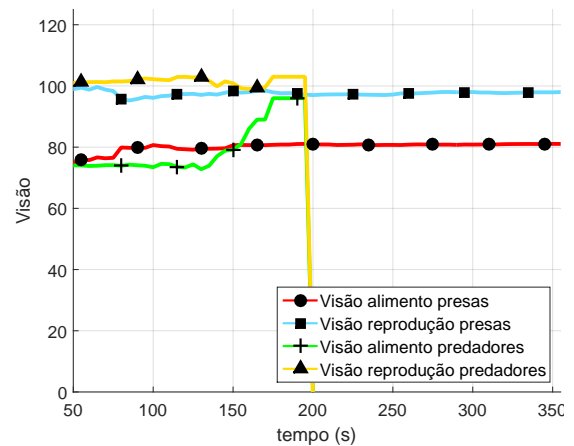
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.1: Experimento I.2. (a) Tela inicial da simulação; (b) Tela final da simulação; (c) Gráfico da evolução dos componentes RGB das cores das presas em relação à cor do ambiente; (d) Gráfico da quantidade de indivíduos; (e) Gráfico da evolução da velocidade das presas e predadores; e (f) Gráfico da evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução das presas e predadores.

4.0.3 Classe de experimento II

Nesta classe de experimento, é possível observar a convivência entre as presas e os predadores. Há uma maior quantidade de presas, isso se dá pela grande capacidade de reprodução desse tipo de organismo virtual dadas as condições iniciais. É possível observar um aumento significativo na população de presas e um equilíbrio na população dos predadores.

A sobrevivência das duas espécies simuladas é possível, pois a taxa de crescimento populacional das presas é maior do que a taxa de reprodução dos predadores, ou seja, por mais que os predadores se alimentem de uma quantidade de presas, as presas se reproduzem e compensam a parte da população que foi predada.

Quanto mais as presas se reproduzem, maior a probabilidade de continuarem se reproduzindo pois a quantidade de organismos virtuais aumenta. Isso resulta em um crescimento exponencial da população das presas, pois elas não têm recursos que as limite.

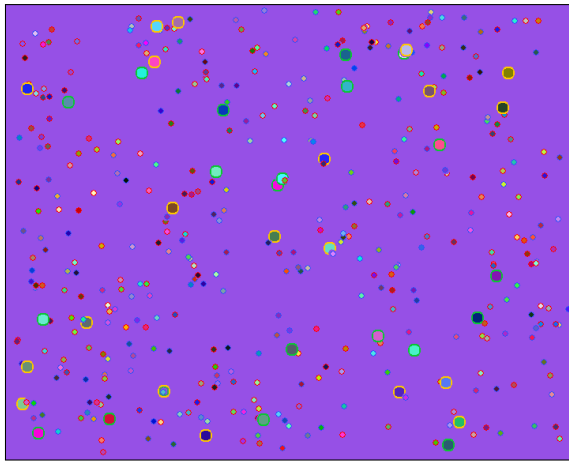
Assim como na classe de experimento I, a classe II é caracterizada por não ter nenhum módulo habilitado (Tabela 4.1). As classes I e II possuem as mesmas características para que seja válida a comparação entre as duas classes. Observa-se que variando apenas a quantidade inicial de presas e predadores, o resultado é alterado. Na classe I, a população de presas evolui para um estado bem adaptado e os predadores são extintos. Na classe II, não há a evolução da camuflagem das presas e a população de predadores se mantém estável.

Vale destacar que o experimento II.2, cujos resultados estão sintetizados no Anexo D.2.1, apresenta um comportamento interessante e inesperado. É possível observar que no final da simulação, a maior parte dos organismos virtuais se concentram em uma região do ambiente (lado esquerdo), esse grupo de presas é formado devido a grande quantidade de indivíduos aglomerados. Os predadores são atraídos pelo grupo de presas, mas não conseguem atingir o centro do grupo, pois ficam ao redor do grupo se alimentando das presas mais afastadas do centro, permitindo que a região central do grupo formado seja propícia para a reprodução, visto que é livre de predação. Esse comportamento proporciona a convivência entre as duas espécies simuladas no sentido de que os predadores conseguem se alimentar e as presas se reproduzirem em um nível mais equilibrado.

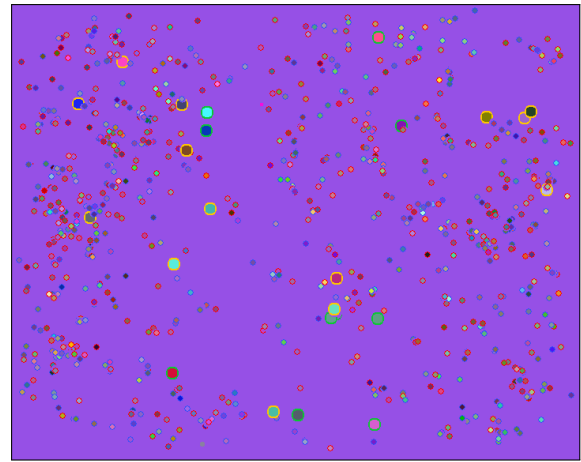
A Tabela 4.4 e a Figura 4.2 resumem as configurações dos quatro experimentos da classe de experimentos I e os resultados obtidos para o experimento II.1, respectivamente.

Tabela 4.4: Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe II.

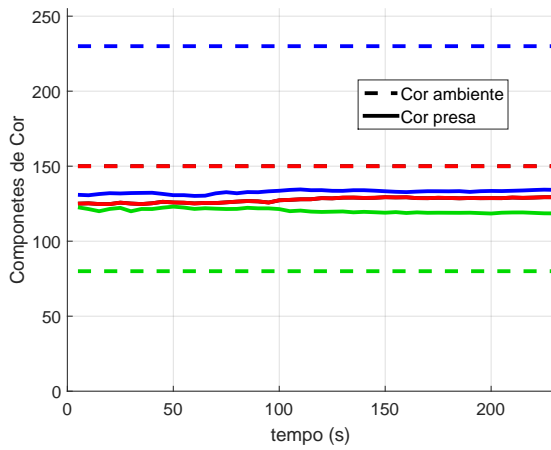
Exp.	Cor do ambiente			Quant. presas iniciais		Quant. pred. iniciais	
	CA_r	CA_g	CA_b	$QIPSM$	$QIPSF$	$QIPDM$	$QIPDF$
II.1.	150	80	230	200	200	20	20
II.2.	250	180	30	150	150	20	20
II.3.	50	120	190	100	100	10	10
II.4.	150	255	210	120	120	15	15



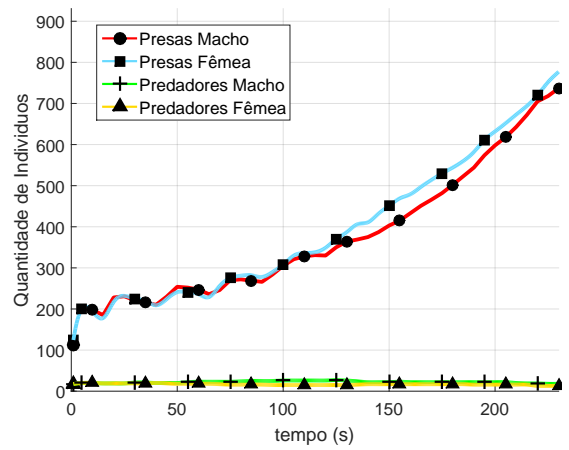
(a)



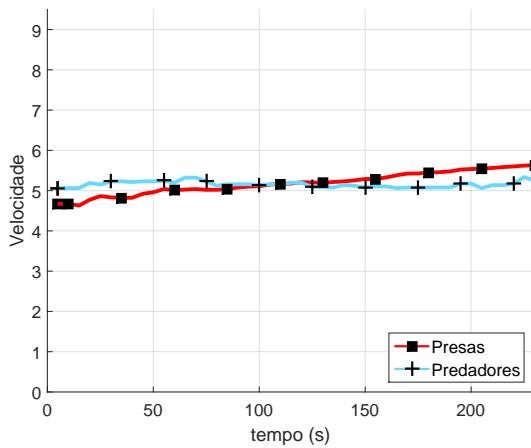
(b)



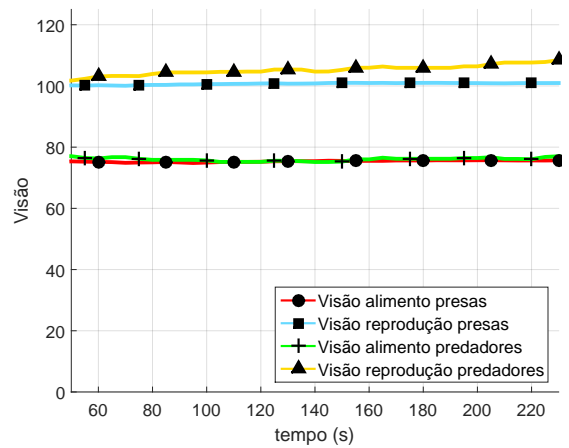
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.2: Experimento II.1. (a) Tela inicial da simulação; (b) Tela final da simulação; (c) Gráfico da evolução dos componentes RGB das cores das presas em relação à cor do ambiente; (d) Gráfico da quantidade de indivíduos; (e) Gráfico da evolução da velocidade das presas e predadores; e (f) Gráfico da evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução das presas e predadores.

4.0.4 Classe de experimento III

Nessa classe de experimentos ambas as espécies simuladas são extintas. Contudo, antes que houvesse a extinção de presas, os poucos indivíduos dessa espécie que restaram vivos, eram camuflados.

Inicialmente, a população de predadores cresce e a população de presas diminui. Isso se dá pelo fato da cor dos indivíduos da população inicial de presas é aleatória e apenas uma pequena porção deles está camuflada. Dessa forma, os predadores detectam facilmente as presas e se alimentam delas. A população de predadores cresce, mesmo que de forma sutil devido à reprodução que acontece paralela à predação.

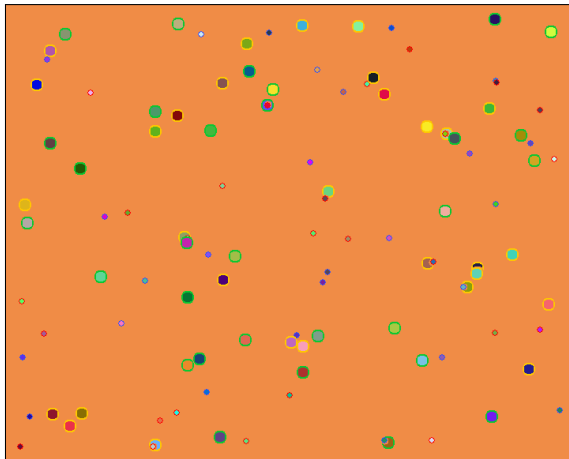
A população de presa diminui até atingir a extinção ou até que sobrem poucos indivíduos camuflados que não sejam suficientes para gerar outros descendentes camuflados. Conforme a população de presas diminui e torna-se mais difícil de um predador identificar uma presa (não camuflada), e a população de predadores vai aos poucos acabando pela falta de alimento.

Como pode ser observado na Tabela 4.1, o que caracteriza a classe I de experimentos é o fato de que não foi habilitado nenhum módulo.

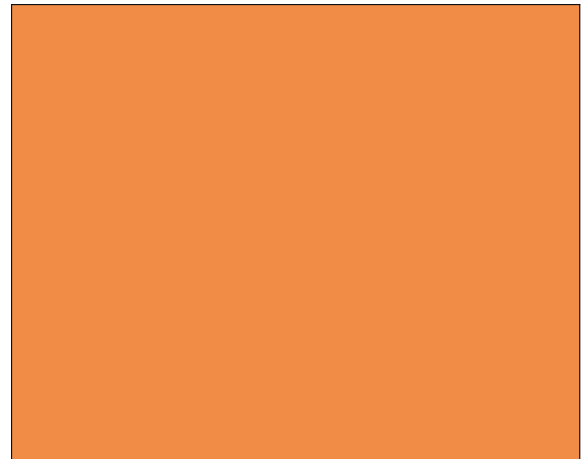
Assim como nas classes de experimento I e II, a classe III é caracterizado por não ter nenhum módulo habilitado, como pode ser observado na Tabela 4.1. As três classes I, II e III possuem as mesmas características para que seja válida uma comparação entre eles. Observa-se que variando apenas a quantidade inicial de presas e predadores o resultado é alterado. Na classe III, a seleção natural é imposta sobre a população de presas, contudo não restam indivíduos suficientes para que exista uma nova geração de organismos virtuais bem adaptados (camuflados).

Tabela 4.5: Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe III.

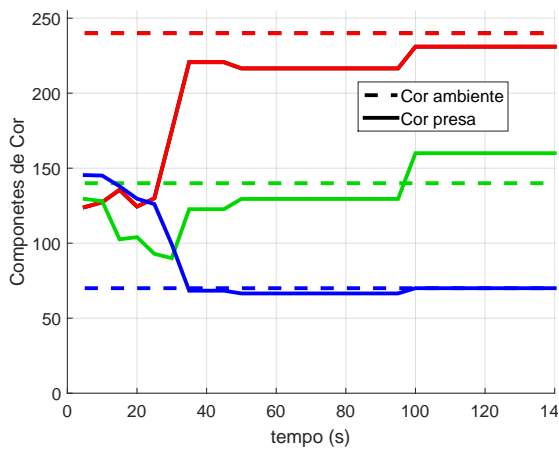
Exp.	Cor do ambiente			Quant. presas iniciais		Quant. pred. iniciais	
	CA_r	CA_g	CA_b	$QIPSM$	$QIPSF$	$QIPDM$	$QIPDF$
VII.1.	240	140	70	30	30	30	30
VII.2.	240	220	140	20	20	60	60
VII.3.	255	255	255	80	80	80	80
VII.4.	50	255	110	50	50	200	200



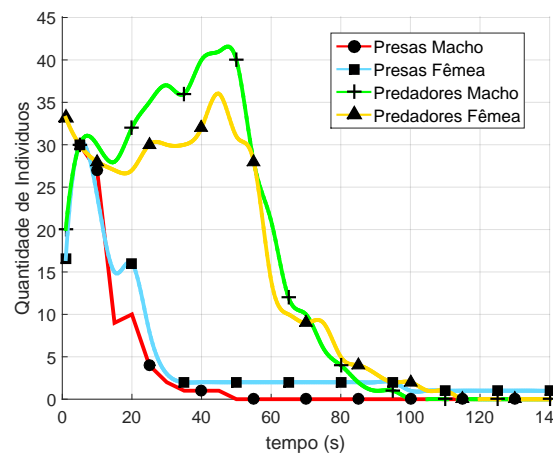
(a)



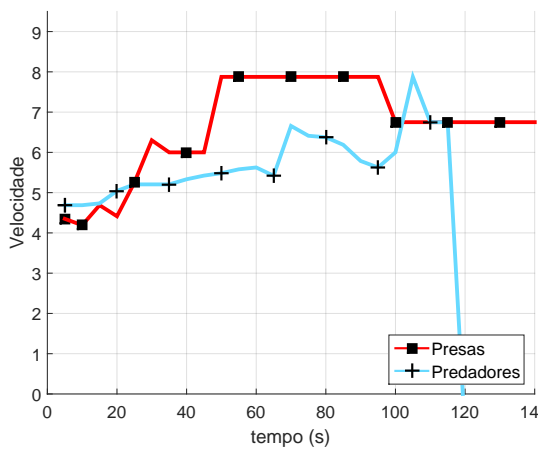
(b)



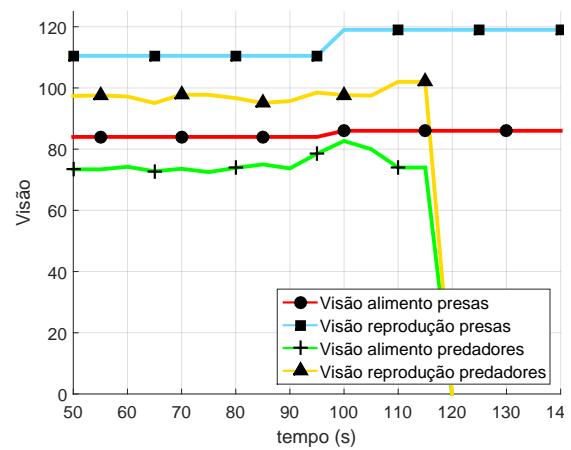
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.3: Experimento III.1. (a) Tela inicial da simulação; (b) Tela final da simulação; (c) Gráfico da evolução dos componentes RGB das cores das presas em relação à cor do ambiente; (d) Gráfico da quantidade de indivíduos; (e) Gráfico da evolução da velocidade das presas e predadores; e (f) Gráfico da evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução das presas e predadores.

4.0.5 Classe de experimento IV

Nesta classe de experimento é possível observar a extinção dos predadores após um determinado período de tempo e a prevalência de presas

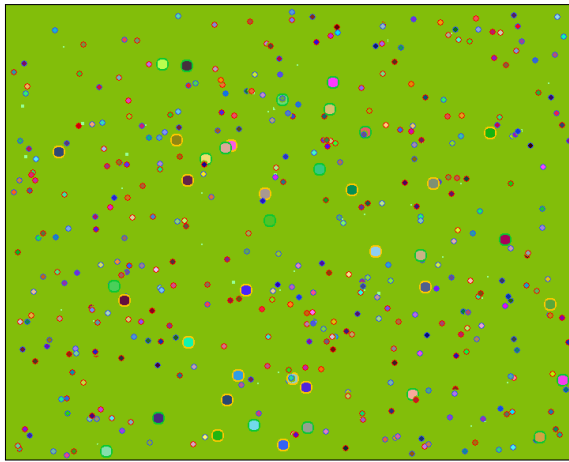
Esta classe de experimento se assemelha à classe I, contudo os módulos de fome das presas e de recursos para presas são habilitados, como pode ser observado na Tabela 4.1. Isso limita a população de presas após a camuflagem (e posterior morte da população de predadores) e propicia a competição intraespecífica por recursos.

Para esta classe foram feitos oito experimentos de forma que pudesse ser comparada adequadamente com a classe de experimentos V que engloba mutação.

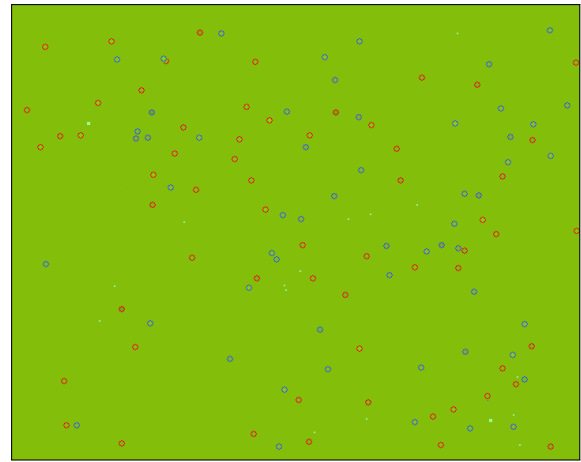
A Tabela 4.6 e a Figura 4.4 resumem as configurações dos oito experimentos realizados para a classe de experimentos IV e os resultados obtidos para o experimento IV.7, respectivamente.

Tabela 4.6: Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe IV.

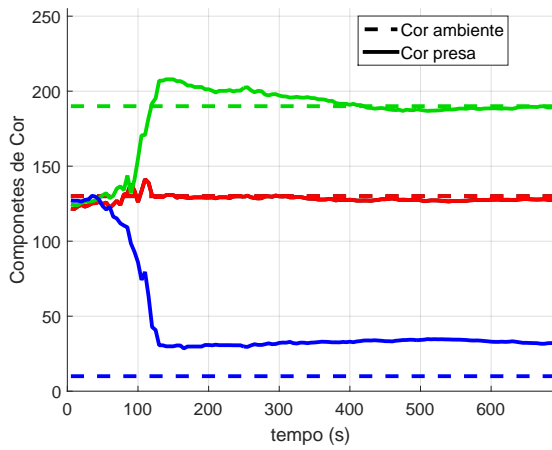
Exp.	Cor do ambiente			Quant. presas iniciais		Quant. pred. iniciais	
	CA_r	CA_g	CA_b	$QIPSM$	$QIPSF$	$QIPDM$	$QIPDF$
III.1.	10	150	90	100	100	20	20
III.2.	250	50	190	125	125	15	15
III.3.	25	75	170	150	150	10	10
III.4.	130	20	40	300	300	20	20
III.5.	230	155	70	200	200	25	25
III.6.	30	115	0	200	200	40	40
III.7.	130	190	10	200	200	100	100
III.8.	30	90	140	200	200	200	200



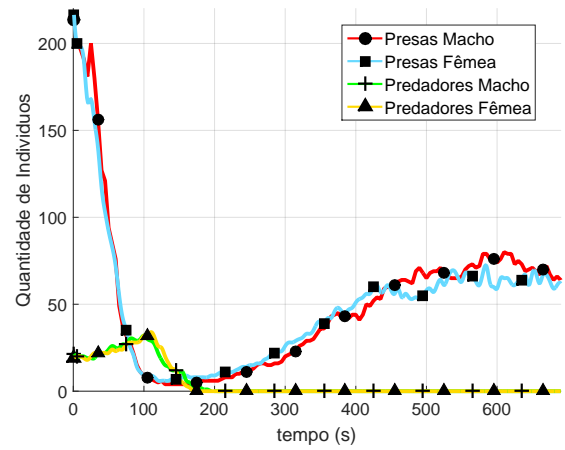
(a)



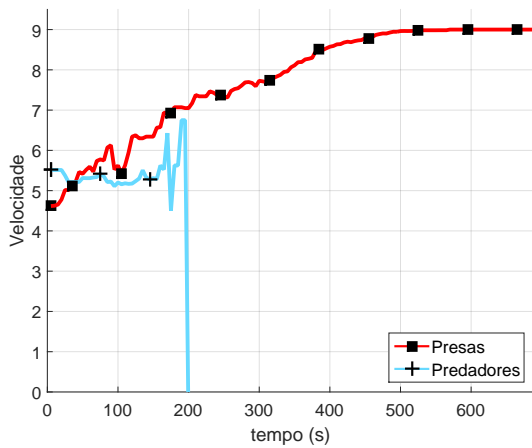
(b)



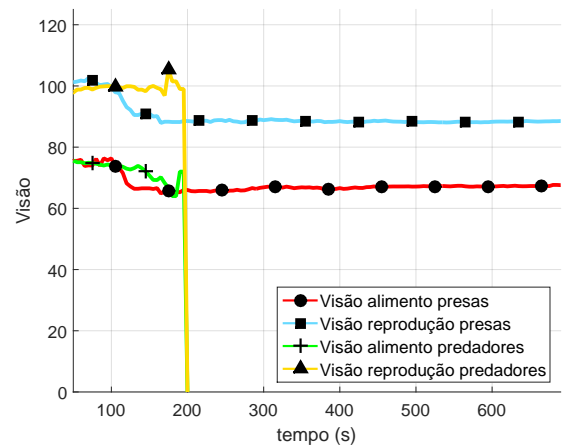
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.4: Experimento IV.7. (a) Tela inicial da simulação; (b) Tela final da simulação; (c) Gráfico da evolução dos componentes RGB das cores das presas em relação à cor do ambiente; (d) Gráfico da quantidade de indivíduos; (e) Gráfico da evolução da velocidade das presas e predadores; e (f) Gráfico da evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução das presas e predadores.

4.0.6 Classe de experimento V

Nesta classe de experimento, é possível observar a extinção dos predadores e a prevalência da população de presas não camufladas.

Essa classe de experimento se assemelha à classe III, contudo o módulo de mutação das presas e predadores é habilitado, como pode ser observado na Tabela 4.1. Ou seja, nem sempre a *cor* de um indivíduo (presa ou predador) será a média das *cores* dos pais. Uma parte da população sofrerá mutação e terá sua *cor* definida aleatoriamente.

É possível notar a variação dos números das populações das presas e predadores é semelhante ao comportamento apresentado nos experimentos da classe IV, exceto pelo fato de que os predadores demoram mais tempo para serem extintos. Pois com a mutação incluída, as presas adquirem uma coloração mais exuberante.

É importante ressaltar que após a extinção dos predadores, aos poucos a população de presas evolui para uma população não camuflada. Isso é o resultado da mutação e da falta de predação no ambiente, como não há predadores para se alimentar das presas que sofreram mutação, os genes mutantes são propagados para as próximas gerações e os organismos virtuais já apresentam entre si, cores bem variadas.

Haverá sempre a chance de haver presas não camufladas estendendo por um período de tempo mais longo o recurso de alimentação dos predadores.

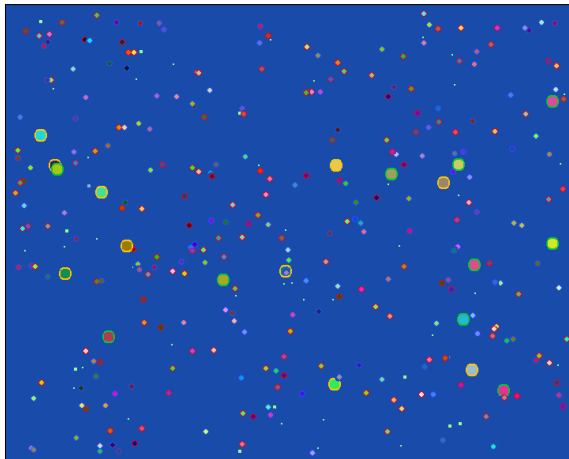
Como pode ser observado na Tabela 4.1, a caracterização da classe V de experimentos é o fato de que o módulo de mutação da cor das presas e predadores foi habilitado. Essa classe possibilita a observação dos efeitos que a mutação causa. A classe V pode ser comparada com a classe IV. A distinção se dá apenas pelo fato de na classe IV o módulo de mutação está habilitado e na classe V não. A Tabela 4.7 mostra a diferença de tempo de extinção dos predadores nos experimentos das classes IV e V. A média aritmética dos valores dos experimentos do classe IV é 201,875 em contraste com 258,125 da classe V. A média do tempo de extinção dos predadores na classe V é maior devido principalmente aos experimentos 1 e 8, valores tão altos não puderam ser observados em nenhum experimento da classe IV. Logo, pode-se concluir que a adição da mutação causou um acréscimo de aproximadamente 27,86% no tempo médio de vida dos predadores.

Tabela 4.7: Tempo de extinção em segundos dos predadores das classes IV e V.

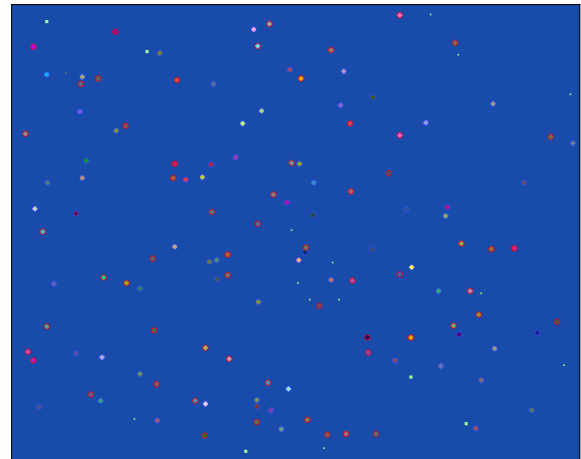
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8
Classe IV	150	200	210	205	240	165	195	250
Classe V	495	190	245	205	170	165	180	415

Tabela 4.8: Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe V.

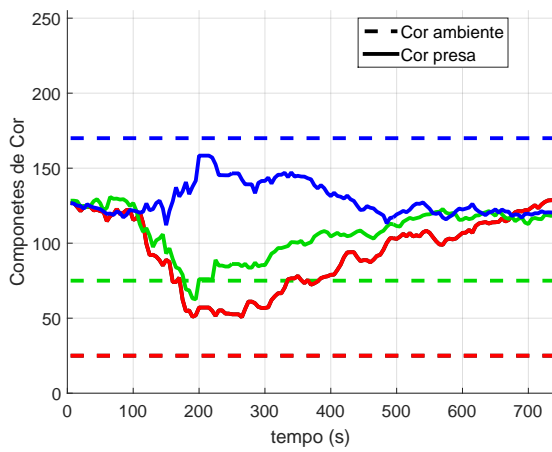
Exp.	Cor do ambiente			Quant. presas iniciais		Quant. pred. iniciais	
	CA_r	CA_g	CA_b	$QIPSM$	$QIPSF$	$QIPDM$	$QIPDF$
IV.1.	10	150	90	100	100	20	20
IV.2.	250	50	190	125	125	15	15
IV.3.	25	75	170	150	150	10	10
IV.4.	130	20	40	300	300	20	20
IV.5.	230	155	70	200	200	25	25
IV.6.	30	115	0	200	200	40	40
IV.7.	130	190	10	200	200	100	100
IV.8.	30	90	140	200	200	200	200



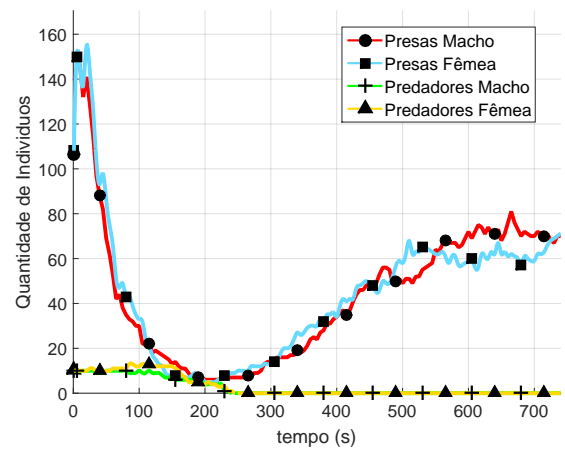
(a)



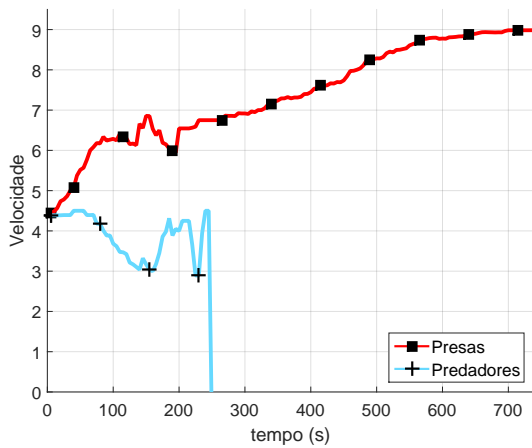
(b)



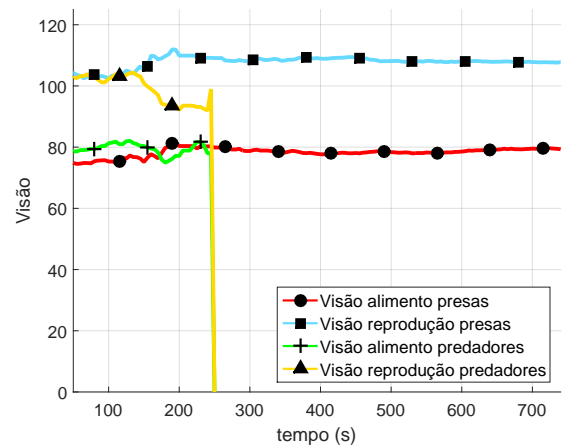
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.5: Experimento V.3. (a) Tela inicial da simulação; (b) Tela final da simulação; (c) Gráfico da evolução dos componentes RGB das cores das presas em relação à cor do ambiente; (d) Gráfico da quantidade de indivíduos; (e) Gráfico da evolução da velocidade das presas e predadores; e (f) Gráfico da evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução das presas e predadores.

4.0.7 Classe de experimento VI

Neste classe de experimento, assim como nos experimentos das classes IV e V, é possível observar a extinção dos predadores e a prevalência das presas. Não ocorreu a evolução da camuflagem das presas.

Como pode ser visto na Tabela 4.1, essa classe de experimento se assemelha à classe V, tendo os módulos de fome das presas, de recursos para presas e de mutação das presas e predadores. Além desses, foi também habilitado o módulo de fuga das presas. Dessa forma, as presas afastam-se dos predadores se os identificarem dentro dos limites de seus *campos de visão de alimentação*.

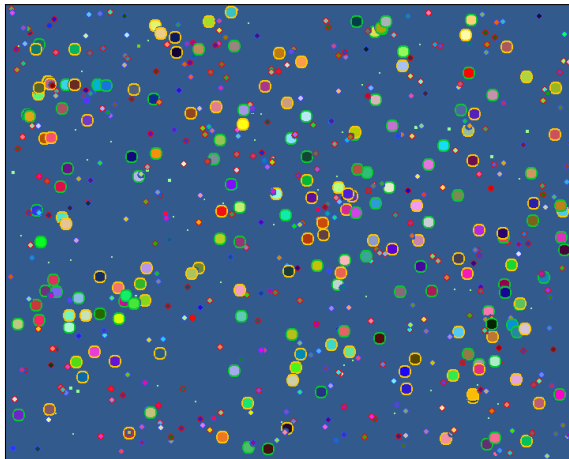
É possível notar que a evolução dos números das populações das presas e predadores é semelhante ao comportamento apresentado nos experimentos da classe V, é esperado que a extinção dos predadores seja mais rápida. Isso ocorre devido a fuga das presas, tornando mais difícil dos predadores se alimentarem. A comparação não foi possível devido ao pequeno número de experimentos realizados.

É importante ressaltar que após a extinção dos predadores, assim como apresentado nos experimentos da classe IV, aos poucos a população de presas evolui para uma população não camuflada. Isso é o resultado da falta de predação no ambiente, como não há predadores para se alimentar das presas que sofreram mutação, os seus genes mutantes são proliferados para as próximas gerações e após algumas gerações, os organismos virtuais já apresentam entre si, cores bem variadas. A evolução das cores das presas pode ser vista nas subfiguras (c) das figuras referentes à classe V.

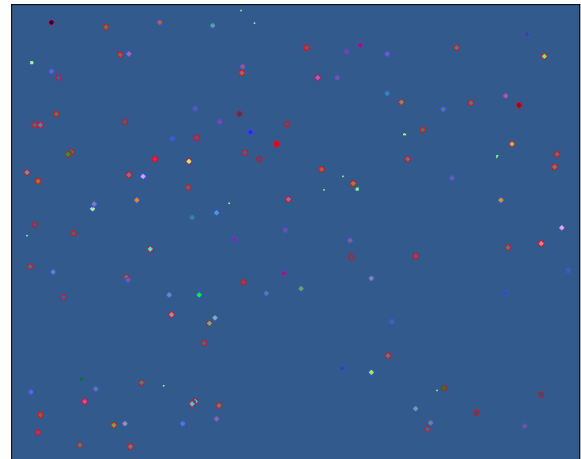
A Tabela 4.9 e a Figura 4.6 resumem as configurações dos quatro experimentos realizados para a classe de experimentos VI e os resultados obtidos para o experimento VI.1, respectivamente.

Tabela 4.9: Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe VI.

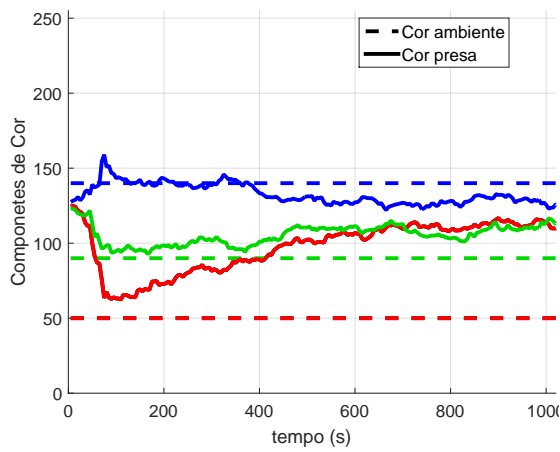
Exp.	Cor do ambiente			Quant. presas iniciais		Quant. pred. iniciais	
	CA_r	CA_g	CA_b	$QIPSM$	$QIPSF$	$QIPDM$	$QIPDF$
V.1.	50	90	140	200	200	100	100
V.2.	150	190	40	200	200	50	50
V.3.	150	90	240	150	150	100	100
V.4.	150	150	150	100	100	50	50



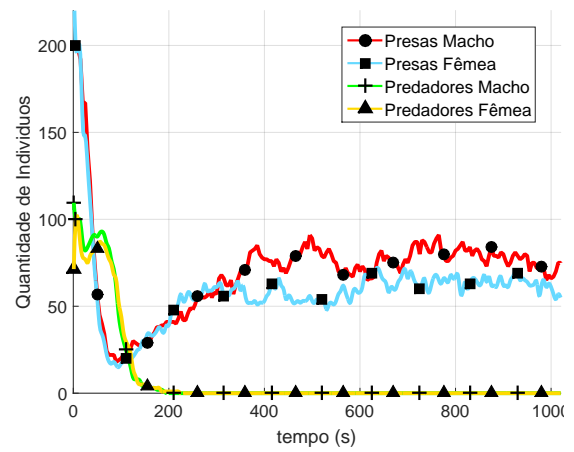
(a)



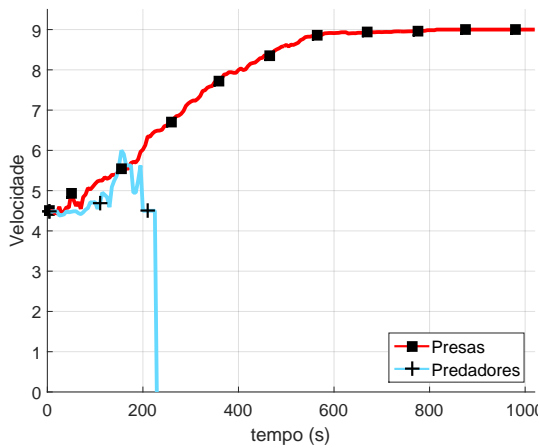
(b)



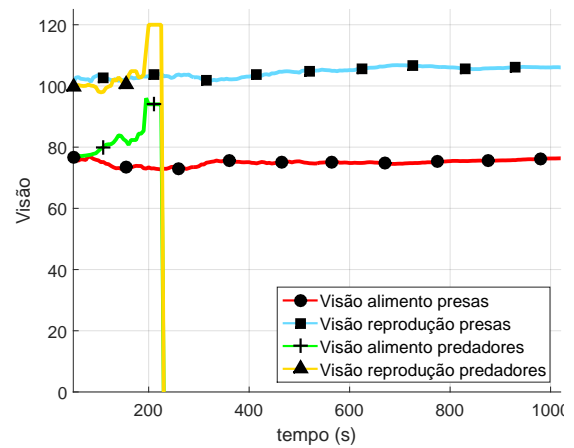
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.6: Experimento VI.1. (a) Tela inicial da simulação; (b) Tela final da simulação; (c) Gráfico da evolução dos componentes RGB das cores das presas em relação à cor do ambiente; (d) Gráfico da quantidade de indivíduos; (e) Gráfico da evolução da velocidade das presas e predadores; e (f) Gráfico da evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução das presas e predadores.

4.0.8 Classe de experimento VII

Nesta classe de experimento, é possível observar a extinção dos predadores e a prevalência das presas camufladas ou mantendo coloração exuberante.

Como pode ser visto na Tabela 4.1, essa classe de experimento se assemelha à classe V, tendo os módulos de fome dos organismos virtuais do tipo presa, de plantas, de mutação das presas e predadores e de fuga das presas. Além desses foi também habilitado o módulo de camuflagem dos predadores. Assim, mesmo que um predador esteja no *campo de visão* de uma presa, se estiver camuflado, a presa não o enxerga, e por isso, não se afasta.

Inicialmente, os predadores se alimentam das presas que não estão camufladas. Enquanto isso, os predadores camuflados propagam suas características, pois as presas não conseguem identificá-los e, por isso, não fogem. Então, os predadores, mesmo que camuflados, aos poucos morrem de fome e a população das presas camufladas se expande. Após a extinção dos predadores, a *cor* geral das presas volta a se destoar da *cor* do fundo.

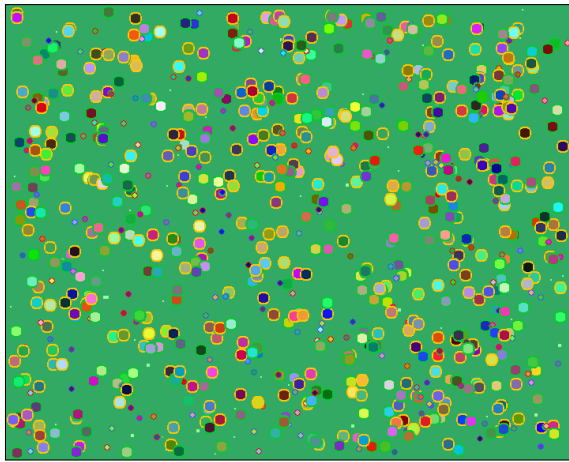
No experimento VII.4, é interessante notar pequenos grupos formados no final da simulação, mesmo que não se tenha implementado nenhum comportamento grupal nos organismos virtuais.

Nesse cenário há a evolução da camuflagem nas presas e predadores. Por exemplo, no experimento VII.3 apresentado na Figura 4.7, em cerca de 175 segundos, em que a população de presas é aproximadamente igual à população de predadores e ambas passaram pelo processo de seleção natural, a média dos componentes de cor dos predadores (125, 3) e das presas (108, 3) são próximas da média da cor do ambiente (106, 7), demonstrando a evolução da camuflagem em ambas espécies.

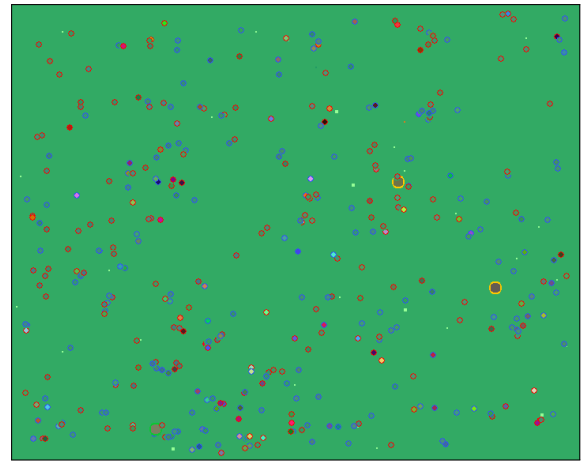
A Tabela 4.10 e a Figura 4.7 resumem as configurações dos quatro experimentos realizados para a classe de experimentos VII e os resultados obtidos para o experimento VII.3, respectivamente.

Tabela 4.10: Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe VII.

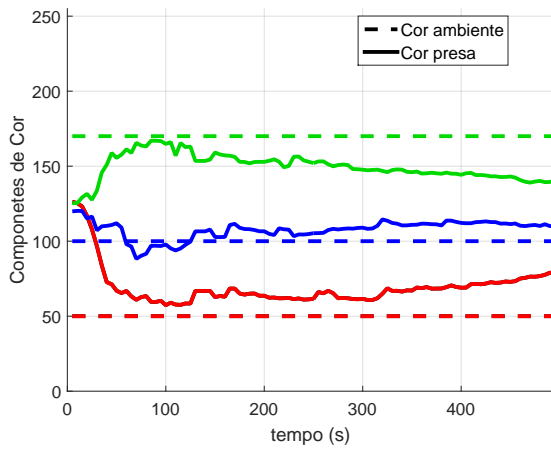
Exp.	Cor do ambiente			Quant. presas iniciais		Quant. pred. iniciais	
	CA_r	CA_g	CA_b	$QIPSM$	$QIPSF$	$QIPDM$	$QIPDF$
VI.1.	250	50	150	100	100	200	200
VI.2.	150	70	10	200	200	200	200
VI.3.	50	170	100	100	100	300	300
VI.4.	150	240	100	150	150	200	200



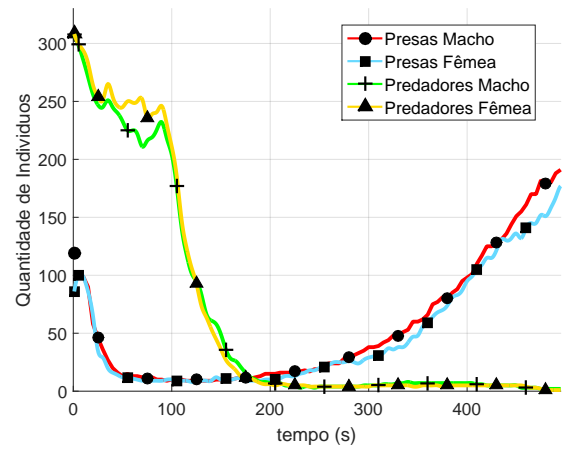
(a)



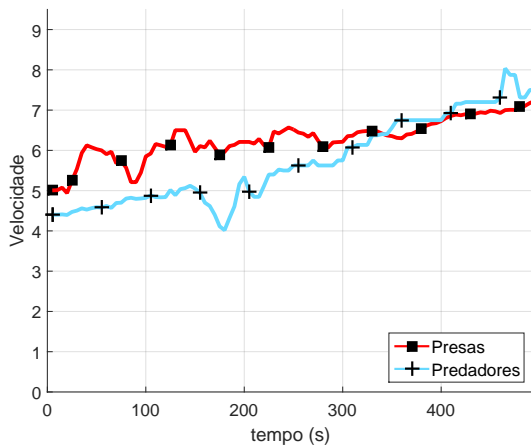
(b)



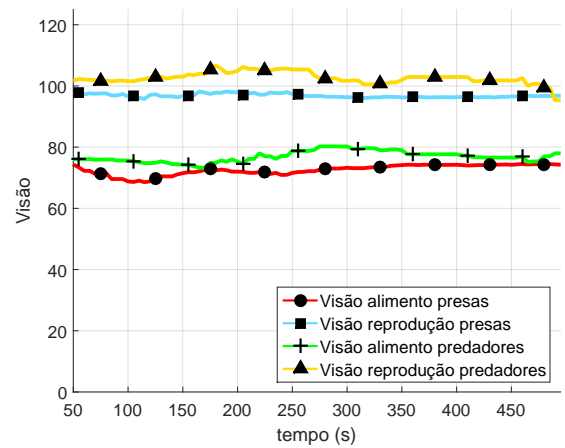
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.7: Experimento VII.3. (a) Tela inicial da simulação; (b) Tela final da simulação; (c) Gráfico da evolução dos componentes RGB das cores das presas em relação à cor do ambiente; (d) Gráfico da quantidade de indivíduos; (e) Gráfico da evolução da velocidade das presas e predadores; e (f) Gráfico da evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução das presas e predadores.

4.0.9 Classe de experimento VIII

Nesta classe de experimento, é possível observar um comportamento variante. Os experimentos VIII.1 e VIII.2 resultaram na extinção de ambas as espécies. O experimento VIII.3 resultou na extinção da população de predadores e na prevalência das presas. E o experimento VIII.4 resultou na sobrevivência das espécies de presas e predadores.

Como pode ser visto na Tabela 4.1, essa classe de experimento abrange todos os módulos. Essa classe é a única que possui lagos, simulando a aplicação do modelo ao cenário fictício (apresentado na Seção 3.3), que simula seres terrestres com a necessidade de consumir água.

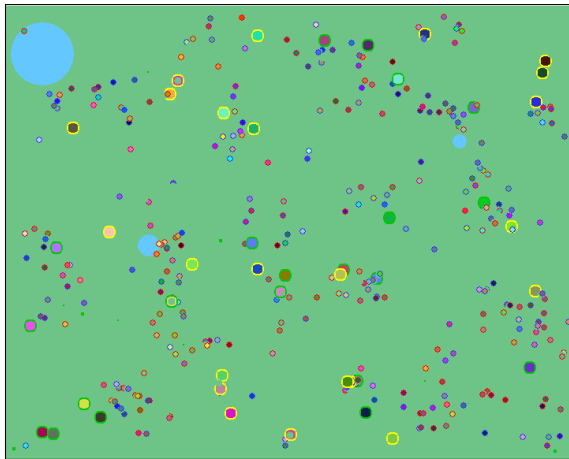
No experimento VIII.1, inicialmente, os predadores se alimentam das presas que não estão camufladas. Após, morrem aos poucos por falta de alimento. A população de presas restante não expandiu seu número pois seus indivíduos não conseguiram consumir água suficiente e morreram aos poucos por falta desse recurso.

O experimento VIII.4 apresenta um resultado interessante. É possível notar oscilações nas populações de presas e predadores que, com o passar do tempo de simulação, se estabilizam e as espécies simuladas alcançam a coexistência. As oscilações na população de presas em relação à população de predadores é característica do modelo presa-predador de Lotka-Volterra (Seção 2.2).

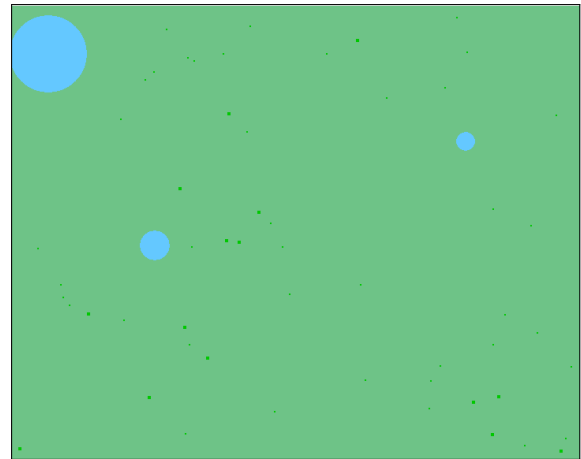
A Tabela 4.11 resume as configurações iniciais dos quatro experimentos realizados para a classe de experimentos VIII.

Tabela 4.11: Tabela com os parâmetros variáveis nos experimentos da classe VIII.

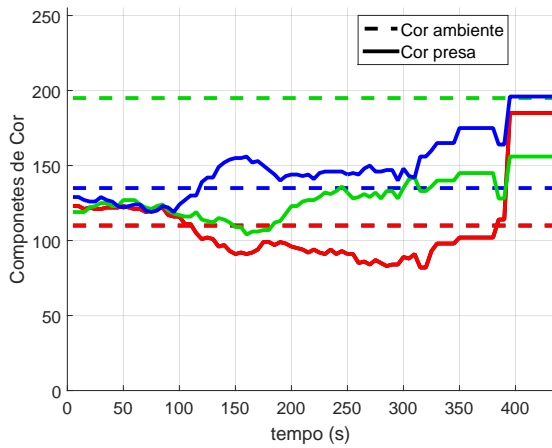
Exp.	Cor do ambiente			Quant. presas iniciais		Quant. pred. iniciais	
	CA_r	CA_g	CA_b	$QIPSM$	$QIPSF$	$QIPDM$	$QIPDF$
VI.1.	110	195	135	150	150	25	25
VI.2.	210	145	165	150	150	25	25
VI.3.	120	155	130	150	150	25	25
VI.4.	105	125	110	130	130	60	60



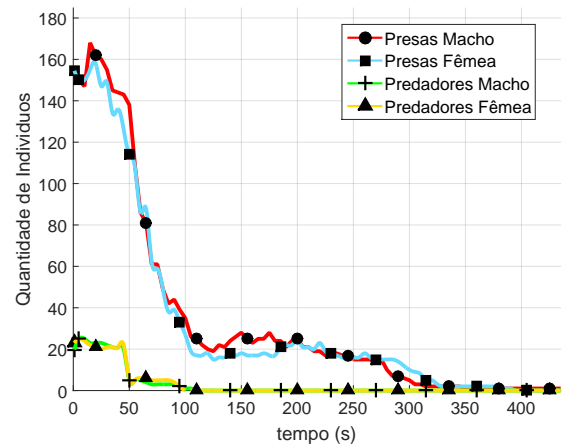
(a)



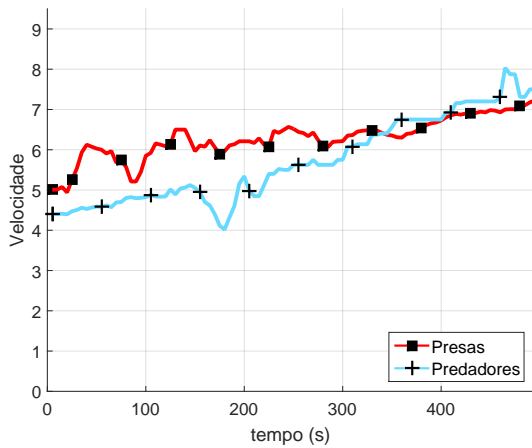
(b)



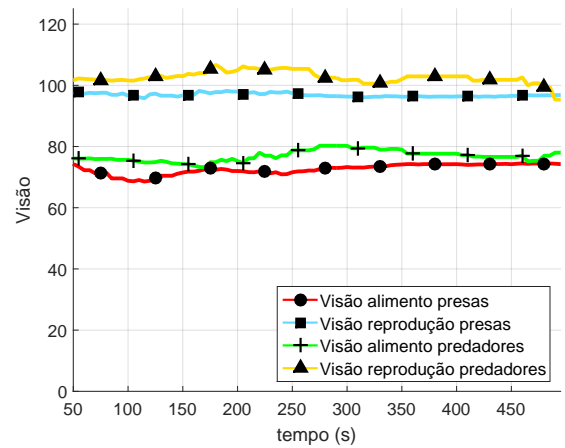
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.8: Experimento VIII.1. (a) Tela inicial da simulação; (b) Tela final da simulação; (c) Gráfico da evolução dos componentes RGB das cores das presas em relação à cor do ambiente; (d) Gráfico da quantidade de indivíduos; (e) Gráfico da evolução da velocidade das presas e predadores; e (f) Gráfico da evolução dos campos de visão de alimentação e reprodução das presas e predadores.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Foi proposto um modelo validado por uma ferramenta de simulação, aqui denominada Demiourgos, que permite observar alguns dos princípios da teoria da evolução das espécies pela seleção natural proposta por Charles R. Darwin. As simulações resultantes de experimentos permitiram a observação do comportamento de presas e predadores, bem como o processo de evolução da camuflagem dos organismos virtuais, confirmando algumas das prerrogativas descritas por John A. Endler [12].

O modelo foi concebido de forma a permitir que seja facilmente transposto para outros cenários. Além disso, é possível incorporar um conjunto mais amplo de informações a respeito do ambiente e do comportamento dos organismos. Observou-se que o ajuste dos valores iniciais dos parâmetros de simulação (presentes no arquivo de configuração) tem um grande impacto no resultado da simulação. Por exemplo, para que um grupo de organismos virtuais possa prosperar e ter uma determinada característica selecionada pelo ambiente, os ajustes desses valores devem ser adequados, caso contrário pode-se observar a não evolução ou a extinção como resultado da simulação.

A plataforma gráfica do software Demiourgos possibilita uma maior interação do usuário, o que agrega ao sistema um carácter didático, podendo ser utilizado para demonstrar e estudar o processo de evolução dos seres vivos por seleção natural. A ferramenta de simulação pode principalmente ser utilizada por pesquisadores que precisam trabalhar com diversas variáveis para compreensão de modelos complexos de interação entre seres vivos, podendo auxiliar na tomada de decisão sobre problemas de conservação de espécies.

Outra aplicação do software proposto é a abstração da ideia de seres virtuais e a concretização de um sistema competitivo em que indivíduos (possíveis soluções) com atributos inicialmente aleatórios são selecionados por outros indivíduos através de uma função que classifica se as características estão ou não próximas do objetivo desejado. É aplicável a situações em que os organismos virtuais tenham diversas características com níveis de importância distintos e que são classificadas como soluções mesmo atingindo apenas a proximidade do objetivo.

Para trabalhos futuros, pretende-se implementar conjuntos de atributos, sob forma de bibliotecas comuns de espécies, para permitir a utilização por pesquisadores e interessados. Todas estas bibliotecas podem ser desenvolvidas a partir de uma estrutura comum de dados a fim de construir um *benchmark* de avaliação, seguindo atributos padrões.

Outra proposta de trabalho futuro é a incorporação na simulação de conjuntos hierárquicos e concorrentes presa-predador, e.g., a ovelha é presa do lobo, o homem é presa do lobo, entretanto a ovelha é presa do homem.

Deseja-se também implementar e acrescentar mais atributos e comportamentos aos organismos virtuais e ambiente no software Demiouros. No que tange as alterações nos organismos virtuais simulados, pode-se citar: a implementação da necessidade de descanso das presas e predadores vinculado ao atributo estamina que indica a quantidade de energia vital de um organismo; a implementação das fêmeas serem mais atraídas por machos de cores mais vistosas, como foi observado nos experimentos de Endler; a implementação da comunicação entre as presas durante a fuga e a comunicação entre os predadores durante a caça; a implementação do comportamento de formação de grupos de presas e predadores que se movimentarão em conjunto. Cada grupo terá um líder que definirá o sentido do movimento do grupo, assim como o comportamento de *Particle Swarm* (Seção 2.3.2); a introdução de mutações em outros atributos das presas e predadores e não apenas na cor; a implementação de sensibilidade variável pra cada predador, ou seja, os sentidos ou a capacidade de detectar presas ser diferentes entre os predadores; implementar a preferência nos organismos fêmea por machos mais vistosos, além da camuflagem influenciar a relação interespecífica para que presas e predadores muito camuflados não sejam vistos por seus parceiros, forçando eles a manter uma relação de concorrência entre estar camuflado mas não muito a ponto de conseguirem procriar [3].

As modificações com relação ao ambiente em trabalhos futuros incluem: a divisão do tempo em dias e noites, assim o ambiente poderia ter comportamentos diferentes influenciando o comportamento das espécies simuladas. Isso poderia acarretar na definição de estações do ano, que em um nível maior acarretaria em outros comportamentos referentes aos períodos do ano (por exemplo, características reprodutivas distintas de uma espécie em determinada época do ano e migrações devido a alterações de clima); outra implementação a ser agregada ao simulador é a divisão do ambiente em áreas com características distintas.

Ainda como trabalhos futuros, pode-se citar a implementação da teoria de Biogeografia de Ilhas [104] e observar o comportamento dos organismos virtuais no que tange a sobrevivência de espécies e migração, entre ilhas e continentes, simulando a probabilidade de uma espécie chegar a uma determinada ilha devido ao tamanho da ilha e à distância entre a ilha e a fonte (continente).

Também é prevista como trabalho futuro a implementação de um algoritmo que automaticamente ajuste os parâmetros de simulação de acordo com o resultado esperado, por exemplo, definir os parâmetros de tal forma a permitir a coexistência das duas espécies em equilíbrio estável (Lotka-Volterra).

Estão incluídos em trabalhos futuros também, a execução de mais experimentos explorando todos os parâmetros ajustáveis, incluindo os módulos *MD*, *MSPS*, *ML* e *MMCA* (Tabela A.1) e as implementações porvindouras citadas anteriormente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. E. Carey, J. J. Ford, and J. S. Chahl. Biologically inspired guidance for motion camouflage. *Control Conference, 2004. 5th Asian*, 3:1793–1799 Vol.3, 2004.
- [2] Richard Dawkins. *O Maior Espetáculo da Terra - As Evidências da Evolução*. Companhia das Letras, São Paulo, 2009.
- [3] John A. Endler. Natural selection on color patterns in poecilia reticulata. *Evolution*, 8=34:76–91, 1980.
- [4] Charles Darwin. *Origem das Espécies, A*. Clássicos de ouro ilustrados. Ediouro Publicações, 2004.
- [5] Charles Darwin. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray, London, 1859.
- [6] Charles Darwin and John Van Wyhe. *The Complete Work of Charles Darwin Online*. University of Cambridge, 2006.
- [7] Colin R. Townsend, Michael Begon, and John L. Harper. *Fundamentos em ecologia*. Artmed Editora, 2009.
- [8] Nivaldo Peroni and Malva Isabel Medina Hernández. *Ecologia de populações e comunidades*. Biologia/EAD/UFSC, 2011.
- [9] David Tilman. *Resource competition and community structure*. Princeton University Press, 1982.
- [10] Thomas Robert Malthus. *An Essay on the Principle of Population Or a View of Its Past and Present Effects on Human Happiness, an Inquiry Into Our Prospects Respecting the Future Removal Or Mitigation of the Evils which it Occasions by Rev. TR Malthus*. Reeves and Turner, 1872.
- [11] Leandro Nunes De Castro. *Fundamentals of natural computing: basic concepts, algorithms, and applications*. CRC Press, 2006.
- [12] John A. Endler. A predator’s view of animal color patterns. In *Evolutionary biology*, pages 319–364. Springer, 1978.
- [13] Kenneth S. Norris. Color adaptation in desert reptiles and its thermal relationships. In *Lizard ecology: a symposium*, pages 162–229. University of Missouri Press Columbia, Missouri, 1967.

- [14] Christine Papageorgis. Mimicry in neotropical butterflies. *American Scientist*, 63:522–532, 1975.
- [15] J. S. Jones. Ecological genetics and natural selection in molluscs climatic selection has an important effect on some patterns of gene distribution in snail populations. *Science*, 182(4112):546–552, 1973.
- [16] Bernard Kettlewell. The evolution of melanism: the study of a recurring necessity with special reference to industrial melanism in the lepidoptera. Technical report, 1973.
- [17] Daniel Otte. Effects and functions in the evolution of signaling systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, pages 385–417, 1974.
- [18] Donn Eric Rosen and Reeve Maclaren Bailey. The poeciliid fishes (cyprinodontiformes), their structure, zoogeography and systematics. 1963.
- [19] Erasmus Darwin. *Zoonomia*. 2 vols. London: J. Johnson, 96, 1794.
- [20] Edward Bagnall Poulton. *The colours of animals: their meaning and use, especially considered in the case of insects*. D. Appleton, 1890.
- [21] F. B. Sumner. Does “protective coloration” protect? - results of some experiments with fishes and birds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 20(10):559–564, 1934.
- [22] E. Curio. The ethology of predation. zoophysiology and ecology (vol. 7), 1976.
- [23] Donald W. Kaufman. Adaptive coloration in *Peromyscus polionotus*: experimental selection by owls. *Journal of Mammalogy*, 55(2):271–283, 1974.
- [24] Edward R. A. Turner. Survival values of different methods of camouflage as shown in a model population. In *Proceedings of the zoological society of London*, volume 136, pages 273–284. Wiley Online Library, 1961.
- [25] Sônia Lopes and Sérgio Rosso. Bio, 2010.
- [26] Alfred J. Lotka. Undamped oscillations derived from the law of mass action. *Journal of the American Chemical Society*, 42(8):1595–1599, 1920.
- [27] Vito Volterra. Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together. *J. Cons. Int. Explor. Mer*, 3(1):3–51, 1928.
- [28] Felipe Luís Pereira Pinheiro. Influência das leis de escala sobre a dinâmica de populações. 2011.

- [29] Leonardo Fibonacci and Laurence Sigler. *Fibonacci's Liber abaci: a translation into modern English of Leonardo Pisano's Book of calculation*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [30] Leonhard Euler. A general investigation into the mortality and multiplication of the human species. *Theoretical Population Biology*, 1(3):307–314, 1970.
- [31] Pierre-François Verhulst. *Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement Correspondance mathématique et physique*. 1838.
- [32] Pierre François Verhulst. Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population. *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles*, 18:14–54, 1845.
- [33] Tiina Zingel. Formal models of dna computing: a survey. In *Proceedings-Estonian Academy Of Sciences Physics Mathematics*, volume 49, pages 90–99. Estonian Academy Publishers; 1999, 2000.
- [34] Adam J. Ruben and Laura F. Landweber. The past, present and future of molecular computing. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 1(1):69–72, 2000.
- [35] Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang. *Quantum computation and quantum information*. Cambridge university press, 2010.
- [36] Andrew S. Tanenbaum and Wagner Luiz Zucchi. *Organização estruturada de computadores*. Pearson Prentice Hall, 2009.
- [37] David A. Patterson and John L. Hennessy. *Computer organization and design: the hardware/software interface*. Newnes, 2013.
- [38] John Von Neumann. First draft of a report on the edvac. *IEEE Annals of the History of Computing*, (4):27–75, 1993.
- [39] Ileana M. Greca and Victoria E. Herscovitz. Superposição linear em ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 5(1), 2011.
- [40] Mika Hirvensalo. *Quantum computing*. Springer, 2013.
- [41] Peter W. Shor. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM review*, 41(2):303–332, 1999.
- [42] Richard Crandall and Carl Pomerance. *Prime numbers: a computational perspective*, volume 182. Springer Science & Business Media, 2006.
- [43] Douglas R. Stinson. *Cryptography: theory and practice*. CRC press, 2005.

- [44] Nikola K. Kasabov. *Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering*. Marcel Alencar, 1996.
- [45] Anil K. Jain, Jianchang Mao, and K. M. Mohiuddin. Artificial neural networks: A tutorial. *Computer*, (3):31–44, 1996.
- [46] S. J. Russell and P. Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall series in artificial intelligence. Prentice Hall, 2010.
- [47] Gareth Jones. Genetic and evolutionary algorithms. *Encyclopedia of Computational Chemistry*, 2:1127–1136, 1998.
- [48] Thomas Bäck. *Evolutionary algorithms in theory and practice*. 1996.
- [49] Zbigniew Michalewicz and Marc Schoenauer. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. *Evolutionary computation*, 4(1):1–32, 1996.
- [50] Thomas Bäck and Hans-Paul Schwefel. An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization. *Evolutionary computation*, 1(1):1–23, 1993.
- [51] David E. Goldberg and John H. Holland. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2):95–99, 1988.
- [52] David E. Goldberg. *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*, volume 412. Addison-wesley Reading Menlo Park, 1989.
- [53] John R. Koza. *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, volume 1. MIT press, 1992.
- [54] Marco Cesar Goldberg and Henrique Pacca L. Luna. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. Elsevier, 2005.
- [55] R. Lakshmi and K. Vivekanandan. An analysis of recombination operator in genetic algorithms. In *Advanced Computing (ICoAC), 2013 Fifth International Conference on*, pages 223–226, Dec 2013.
- [56] Samadhi Nallaperuma, Frank Neumann, and Dirk Sudholt. A fixed budget analysis of randomized search heuristics for the traveling salesperson problem. In *Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '14*, pages 807–814, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [57] Giovanni Giardini and Tamás Kalmár-Nagy. Performance metrics and evaluation of a path planner based on genetic algorithms. In *Proceedings of the 2007 Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems, PerMIS '07*, pages 84–90, New York, NY, USA, 2007. ACM.

- [58] Timo Kötzing, Per Kristian Lehre, Frank Neumann, and Pietro Simone Oliveto. Ant colony optimization and the minimum cut problem. In *Proceedings of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '10*, pages 1393–1400, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [59] S. Guo and V. C. M. Leung. A distributed algorithm for min-max tree and max-min cut problems in communication networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 18(4):1067–1076, Aug 2010.
- [60] Sandeep Chakravorty and Amrita Chakrabarti. Hidden layer optimization of neural network using computational technique. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computing, Communication and Control, ICAC3 '09*, pages 559–561, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [61] Steve Donaldson and Chris Walling. A system for evolving neural architectures. In *Proceedings of the 50th Annual Southeast Regional Conference, ACM-SE '12*, pages 232–237, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [62] Keith L. Downing. The baldwin effect in developing neural networks. In *Proceedings of the 12th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO '10*, pages 555–562, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [63] Shiwei Zhang, Hanshi Wang, Lizhen Liu, Chao Du, and Jingli Lu. Optimization of neural network based on genetic algorithm and bp. In *Cloud Computing and Internet of Things (CCIOT), 2014 International Conference on*, pages 203–207, Dec 2014.
- [64] A. Ademovic, S. Bisanovic, and M. Hajro. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem based on real-coded chromosomes and fuzzy optimization. In *MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pages 1476–1481, April 2010.
- [65] Wei-Xin Ling, Zhen Xing, Zhuo-Ming Chen, and Da-Jun Tang. Designing a fuzzy classifier using genetic algorithm and application in chinese vowel recognition. In *Computational Intelligence and Security (CIS), 2013 9th International Conference on*, pages 344–348, Dec 2013.
- [66] Weirong Liu, Min Wu, Jun Peng, and Guojun Wang. Designing fair flow fuzzy controller using genetic algorithm for computer networks. In *Proceedings of the First ACM/SIGEVO Summit on Genetic and Evolutionary Computation, GEC '09*, pages 361–368, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [67] U. Ansari and S. Alam. Hybrid genetic algorithm fuzzy rule based guidance and control for launch vehicle. In *Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2011 11th International Conference on*, pages 178–185, Nov 2011.

- [68] Zongkai Shao. Genetic algorithms-based fuzzy neural network sliding mode control for brushless doubly fed machine. In *Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering (CCTAE), 2010 International Conference On*, volume 3, pages 467–475, June 2010.
- [69] Hans-Paul Schwefel. *Numerical optimization of computer models*. John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [70] D. Fogel. *Artificial intelligence through simulated evolution*. Wiley-IEEE Press, 2009.
- [71] Angel Fernando Kuri-Morales and Jesús Gutiérrez-García. Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms: A statistical analysis. In *MICAI 2002: Advances in Artificial Intelligence*, pages 108–117. Springer, 2002.
- [72] M. Tim Jones. *Artificial intelligence: a systems approach*. 2008.
- [73] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, volume 4, pages 1942–1948 vol.4, Nov 1995.
- [74] James Kennedy, James F. Kennedy, Russell C. Eberhart, and Yuhui Shi. *Swarm intelligence*. Morgan Kaufmann, 2001.
- [75] Eric Bonabeau, Marco Dorigo, and Guy Theraulaz. *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. Number 1. Oxford university press, 1999.
- [76] Marco Dorigo and Thomas Stützle. *Ant Colony Optimization*. Bradford Company, Scituate, MA, USA, 2004.
- [77] Marco Dorigo, Mauro Birattari, Christian Blum, Maurice Clerc, Thomas Stützle, and Alan Winfield. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence: 6th International Conference, ANTS 2008, Brussels, Belgium, September 22-24, 2008, Proceedings*, volume 5217. Springer, 2008.
- [78] Michael F. Barnsley. *Fractals everywhere*. Academic press, 2014.
- [79] Michael E. Gaddis and Michael J. Zyda. The fractal geometry of nature; its mathematical basis and application to computer graphics. Technical report, DTIC Document, 1986.
- [80] Gaston Julia. Memoire sur l’iteration des fonctions rationnelles. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, pages 47–246, 1918.
- [81] Kenneth Falconer. *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*. John Wiley & Sons, 2004.

- [82] Craig W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In *ACM SIGGRAPH computer graphics*, volume 21, pages 25–34. ACM, 1987.
- [83] Craig W. Reynolds. Steering behaviors for autonomous characters. In *Game developers conference*, volume 1999, pages 763–782, 1999.
- [84] Richard Dawkins. *The blind watchmaker: Why the evidence of evolution reveals a universe without design*. WW Norton & Company, 1986.
- [85] Gregor Mendel. *Experiments in plant hybridisation*. Cosimo, Inc., 2008.
- [86] S. Wright. *Evolution and the Genetics of Populations, Volume 4: Variability Within and Among Natural Populations*. Evolution and the Genetics of Populations. University of Chicago Press, 1984.
- [87] Vassiliki Betty Smocovitis. Unifying biology: The evolutionary synthesis and evolutionary biology. *Journal of the History of Biology*, 25(1):1–65, 1992.
- [88] Demetri Terzopoulos, Xiaoyuan Tu, and Radek Grzeszczuk. Artificial fishes: Autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world. *Artificial Life*, 1(4):327–351, 1994.
- [89] S. Grand. Creatures: an exercise in creation. *IEEE Expert*, 12(4):19–24, Jul 1997.
- [90] Stephen Grand, Dave Cliff, and Anil Malhotra. Creatures: Artificial life autonomous software agents for home entertainment. In *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents*, AGENTS '97, pages 22–29, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [91] Mitchel Resnick. *Turtles, termites, and traffic jams: Explorations in massively parallel microworlds*. Mit Press, 1997.
- [92] Andrew Ilachinski. *Cellular automata: a discrete universe*. World Scientific, 2001.
- [93] John Von Neumann, Arthur W. Burks, et al. Theory of self-reproducing automata. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(1):3–14, 1966.
- [94] Martin Gardner. Mathematical games: The fantastic combinations of john conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 223(4):120–123, 1970.
- [95] Deborah Richards, Michael J. Jacobson, John Porte, Charlotte Taylor, Meredith Taylor, Anne Newstead, Iwan Kelaiah, and Nader Hanna. Evaluating the models and behaviour of 3d intelligent virtual animals in a predator-prey relationship. In *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 1*, AAMAS '12, pages 79–86, Richland, SC, 2012. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

- [96] R. C. Gonzalez and R. D. Woods. *Processamento de Imagens Digitais*. Edgard Blucher, 2000.
- [97] Hassan Manjunath Raghunath. *Hydrology: principles, analysis and design*. New Age International, 2006.
- [98] USGS Water Resources. O ciclo da água (the water cycle). website: <http://water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>, Abril 2016.
- [99] Bjarne Stroustrup. *The C++ programming language*. Pearson Education India, 1986.
- [100] Kris Jamsa and LARS Klander. Programando em c/c++, a bíblia. Ed. Makron Books, 1999.
- [101] Gregory V. Wilson and Paul Lu. Parallel programming using c++. scientific and engineering computation series, 1996.
- [102] A. Gregory. Foundations of multithreaded, parallel, and distributed programming. ISBN, 201357526:27–69, 2000.
- [103] Michael Main. The winbgim library - borland bgi graphics and mouse for windows applications. website: <http://winbgim.codecutter.org/>, Janeiro 2016.
- [104] R. H. MacArthur and E. O. Wilson. *The Theory of Island Biogeography*. Landmarks in Biology Series. Princeton University Press, 1967.

Apêndices

A. ATRIBUTOS

A.1 ATRIBUTOS DO GERENTE

Tabela A.1: Parâmetros de entrada da simulação referentes ao gerente, armazenados no arquivo de configuração.

Informação	Descrição
<i>TAR</i>	Tempo de atualização do relatório
<i>MMC</i>	Módulo de mutação de cor das presas e predadores
<i>MD</i>	Módulo de doenças das presas e predadores
<i>MSPS</i>	Módulo de sede das presas e predadores
<i>ML</i>	Módulo de lagos
<i>MFMPs</i>	Módulo de fome das presas
<i>MP</i>	Módulo de plantas
<i>MFGPS</i>	Módulo de fuga das presas
<i>MCPD</i>	Módulo de camuflagem dos predadores
<i>MMCA</i>	Módulo de mudança de cor do ambiente

A.2 ATRIBUTOS DO AMBIENTE

Tabela A.2: Parâmetros de entrada da simulação referentes ao ambiente, armazenados no arquivo de configuração.

Informação	Descrição
<i>QCH</i>	Quantidade de células horizontais do campo de simulação
<i>QCV</i>	Quantidade de células verticais do campo de simulação
<i>CA_r</i>	Componente R da cor do ambiente
<i>CA_g</i>	Componente G da cor do ambiente
<i>CA_b</i>	Componente B da cor do ambiente
<i>FMA</i>	Frequência de mudança do ambiente
<i>IMA</i>	Intensidade de mudança do ambiente
<i>VMinCA_r</i>	Varição Mínima do componente R da Cor do Ambiente
<i>VMáxCA_r</i>	Varição Máxima do componente R da Cor do Ambiente
<i>VMinCA_g</i>	Varição Mínima do componente G da Cor do Ambiente
<i>VMáxCA_g</i>	Varição Máxima do componente G da Cor do Ambiente
<i>VMinCA_b</i>	Varição Mínima do componente B da Cor do Ambiente
<i>VMáxCA_b</i>	Varição Máxima do componente B da Cor do Ambiente

A.3 ATRIBUTOS DOS LAGOS

Tabela A.3: Parâmetros de entrada da simulação referentes aos lagos, armazenados no arquivo de configuração.

Informação	Descrição
CL_r	Componente R da cor dos lagos
CL_g	Componente G da cor dos lagos
CL_b	Componente B da cor dos lagos
TOL	Tempo de oscilação dos lagos
VL_{min}	Volume mínimo dos lagos
$VL_{máx}$	Volume máximo dos lagos

A.4 ATRIBUTOS DOS PLANTAS

Tabela A.4: Parâmetros de entrada da simulação referentes às plantas, armazenados no arquivo de configuração.







Informação	Descrição
CP_r	Componente R da cor das plantas
CP_g	Componente G da cor das plantas
CP_b	Componente B da cor das plantas
QPP	Quantidade de plantas pequenas
QPG	Quantidade de plantas grandes
TMP	Tempo de morte das plantas

A.5 ATRIBUTOS DOS ORGANISMOS VIRTUAIS, PRESA E PREDADOR.

Parâmetro	Descrição
$QIPSM$	Quantidade inicial de presas macho
$QIPSF$	Quantidade inicial de presas fêmea
$QIPDM$	Quantidade inicial de predadores macho
$QIPDF$	Quantidade inicial de predadores fêmea
T_{ps}	Tamanho da presa
T_{pd}	Tamanho do predador
IMM_{ps}	Idade média máxima das presas macho
$VIMM_{ps}$	Variação da idade média máxima das presas macho
IMF_{ps}	Idade média máxima das presas fêmea
$VIMF_{ps}$	Variação da idade média máxima das presas fêmea
IMM_{pd}	Idade média máxima dos predadores macho
$VIMM_{pd}$	Variação da idade média máxima dos predadores macho
IMF_{pd}	Idade média máxima dos predadores fêmea
$VIMF_{pd}$	Variação da idade média máxima dos predadores fêmea
A_{ps}	Área de interesse das presas
VA_{ps}	Variação da área de interesse das presas
A_{pd}	Área de interesse dos predadores
VA_{pd}	Variação da área de interesse dos predadores
TG_{ps}	Tempo de gestação das presas
TG_{pd}	Tempo de gestação dos predadores
TR_{ps}	Tempo de resguardo das presas
TR_{pd}	Tempo de resguardo dos predadores
$CV A_{ps}$	Valor máximo do campo de visão das presas
$CV A_{pd}$	Valor máximo do campo de visão dos predadores
$WSAF_{ps}$	Valor máximo do campo de visão de reprodução das presas
$VWSAF_{ps}$	Variação do campo de visão de reprodução das presas
$WSAF_{pd}$	Valor máximo do campo de visão de reprodução dos predadores
$VWSAF_{pd}$	Variação do campo de visão de reprodução dos predadores
FDM_{ps}	Fator <i>delay</i> máximo das presas
FDM_{pd}	Fator <i>delay</i> máximo dos predadores
TS_{ps}	Tempo de saciedade das presas
TF_{ps}	Tempo de fome das presas
TS_{pd}	Tempo de saciedade dos predadores
TF_{pd}	Tempo de fome dos predadores
NP	Nível de perseguição
IM_{ps}	Intensidade de mutação das presas
IM_{pd}	Intensidade de mutação dos predadores
ID_{ps}	Intensidade de doença das presas
ID_{pd}	Intensidade de doença dos predadores
$PC1_{ps}$	Porcentagem da vida da presa na categoria 1
$PC2_{ps}$	Porcentagem da vida da presa na categoria 2
$PC3_{ps}$	Porcentagem da vida da presa na categoria 3
$PC4_{ps}$	Porcentagem da vida da presa na categoria 4
$PC1_{pd}$	Porcentagem da vida do predador na categoria 1
$PC2_{pd}$	Porcentagem da vida do predador na categoria 2
$PC3_{pd}$	Porcentagem da vida do predador na categoria 3
$PC4_{pd}$	Porcentagem da vida do predador na categoria 4
$FRCV_{ps}$	Fator de redução do campo de visão das presas
$FRCV_{pd}$	Fator de redução do campo de visão dos predadores

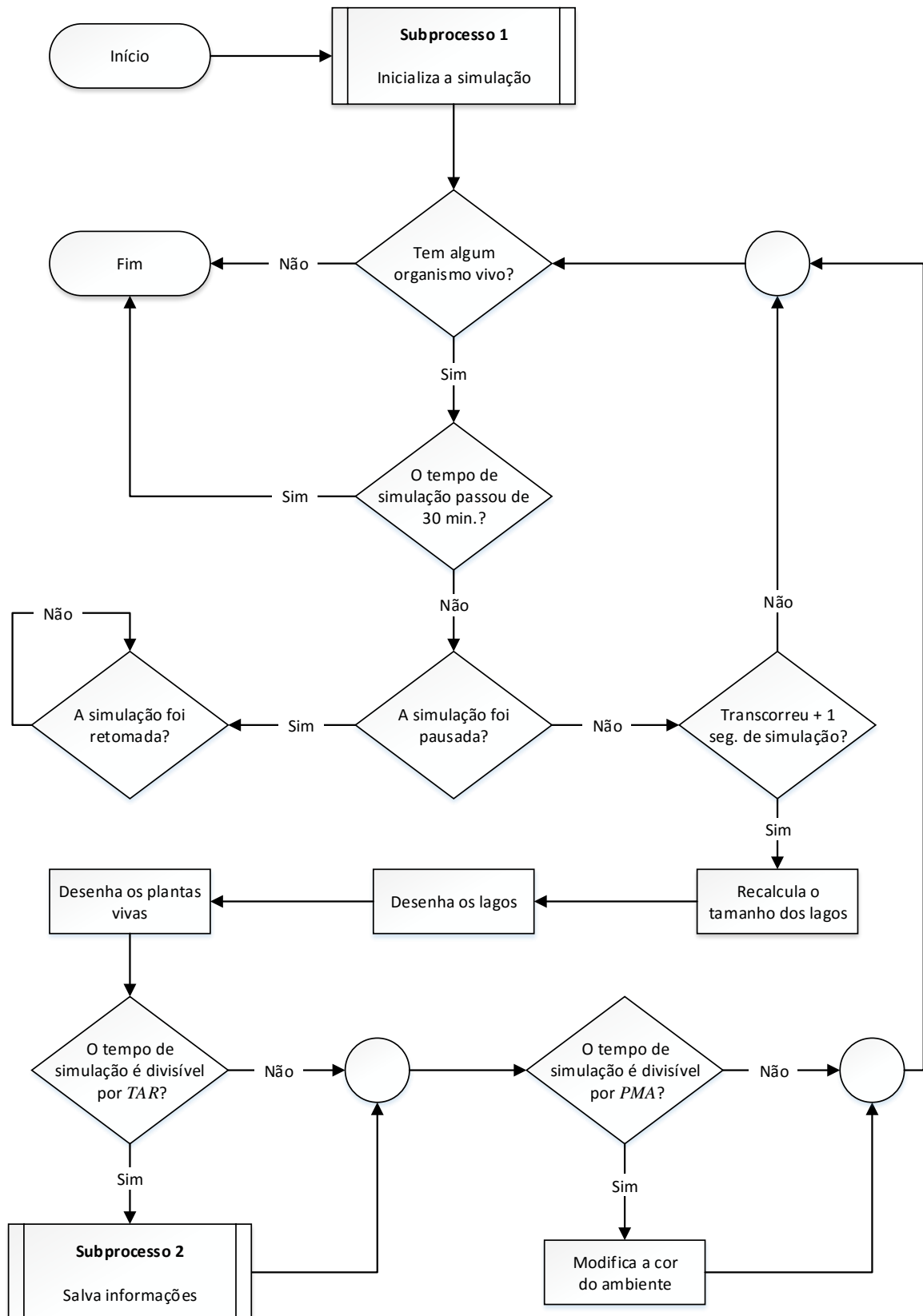
B. FLUXOGRAMAS

B.1 SIGNIFICADO DAS FORMAS DOS FLUXOGRAMAS

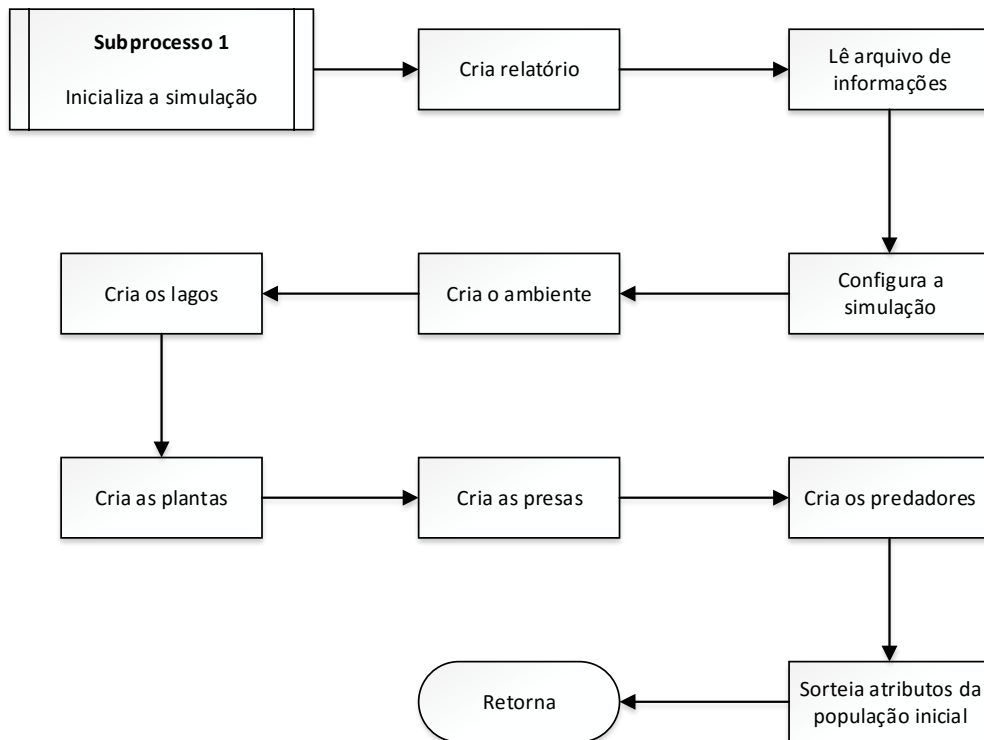
Forma	Significado
	Início ou fim de um diagrama.
	Processo ou tarefa.
	Conector. Une dois ou mais fluxos em apenas um.
	Decisão. Divide um fluxo em dois ou mais.
	Atraso temporal.
	Sub-processo. Os sub-processos podem retornar valores no final de sua execução. O valor de retorno é tratado no diagrama que o chamou.

B.2 FLUXOGRAMAS GERENTE

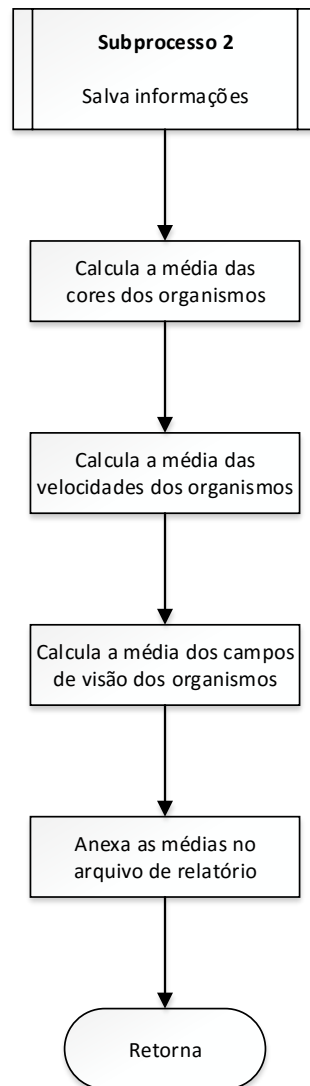
B.2.1 Fluxograma do ciclo de vida do gerente.



B.2.2 Fluxograma do subprocesso *Inicializa a simulação*

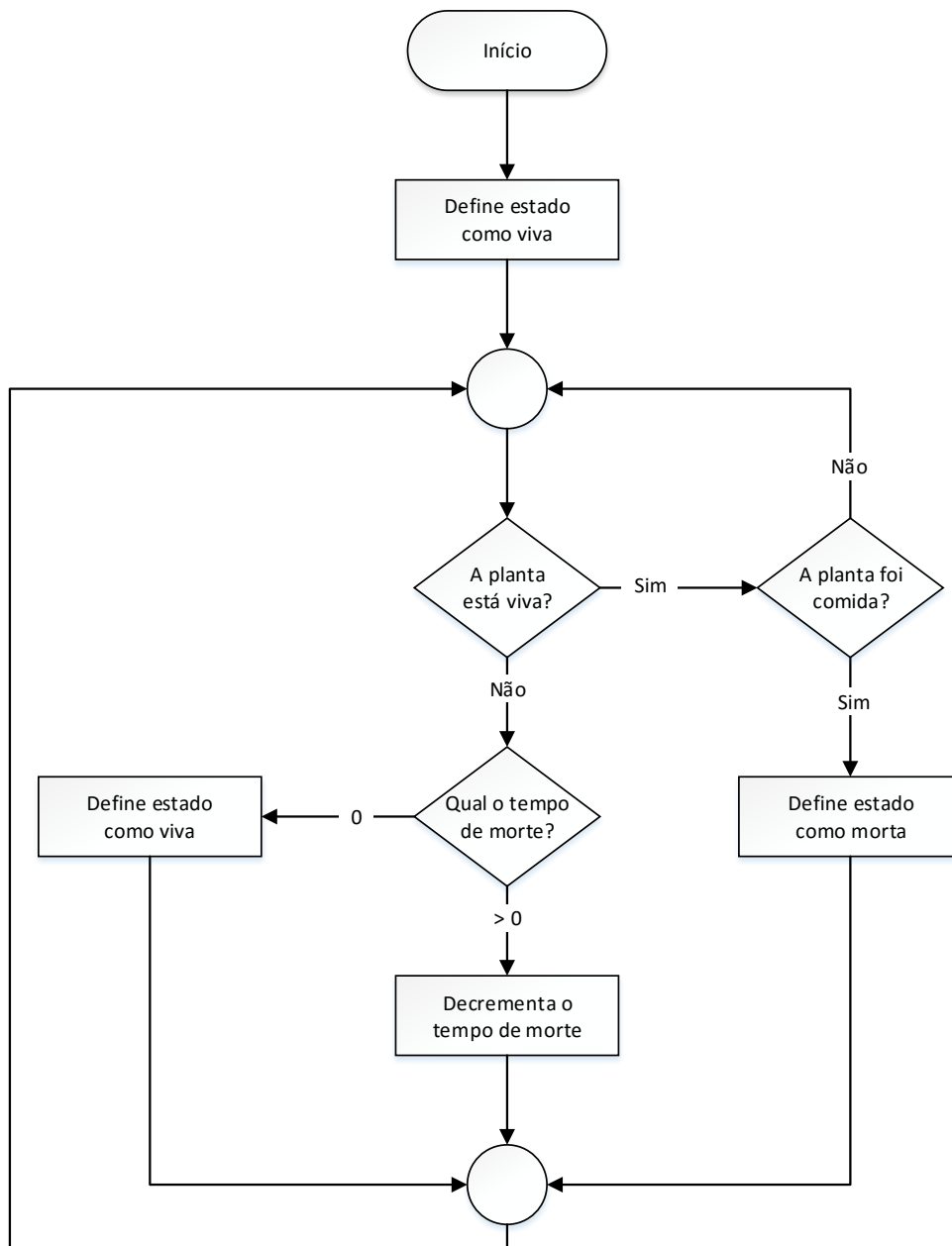


B.2.3 Fluxograma do subprocesso *Salva informações*



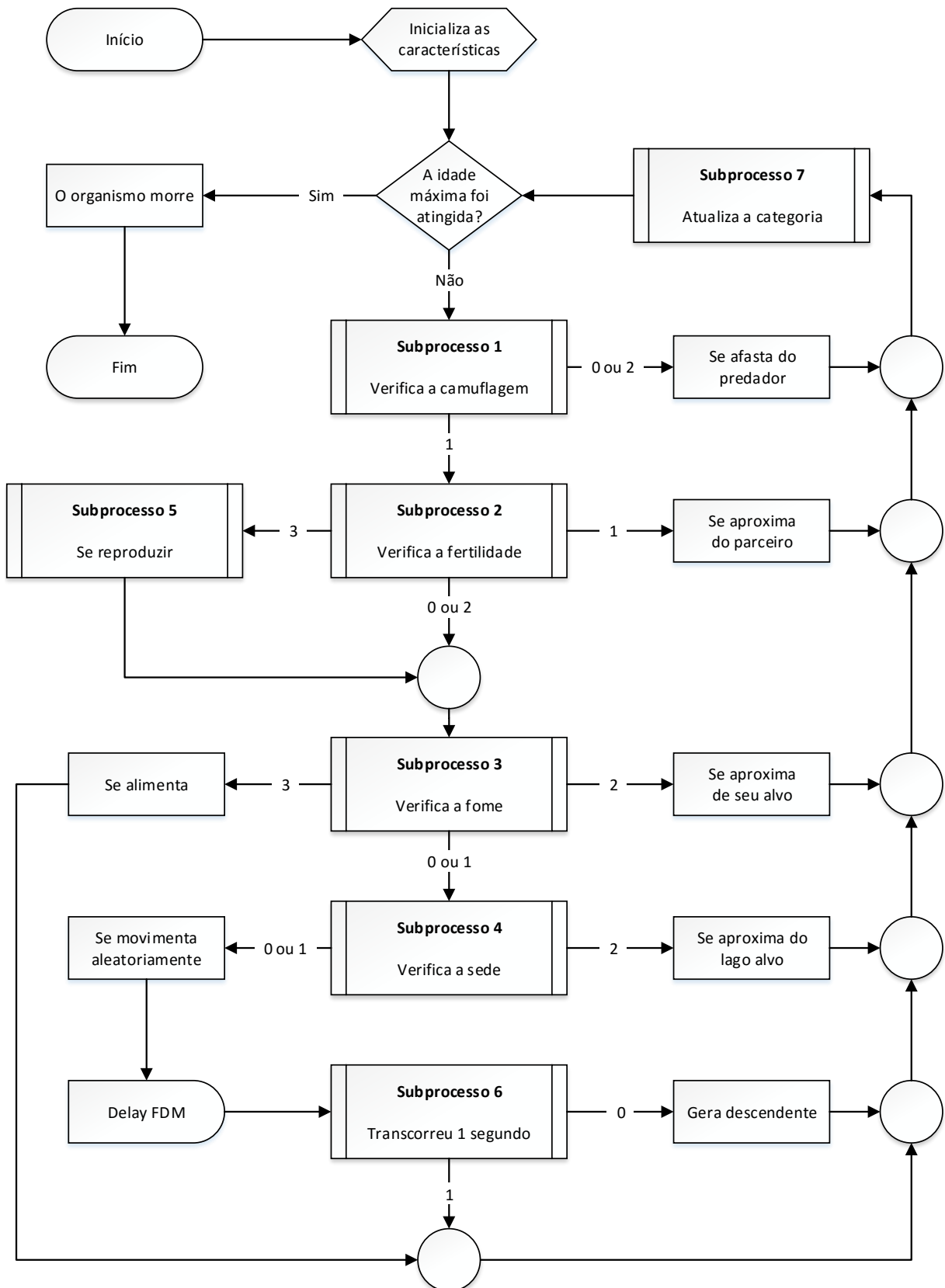
B.3 FLUXOGRAMAS PLANTAS

B.3.1 Fluxograma do ciclo de vida das plantas

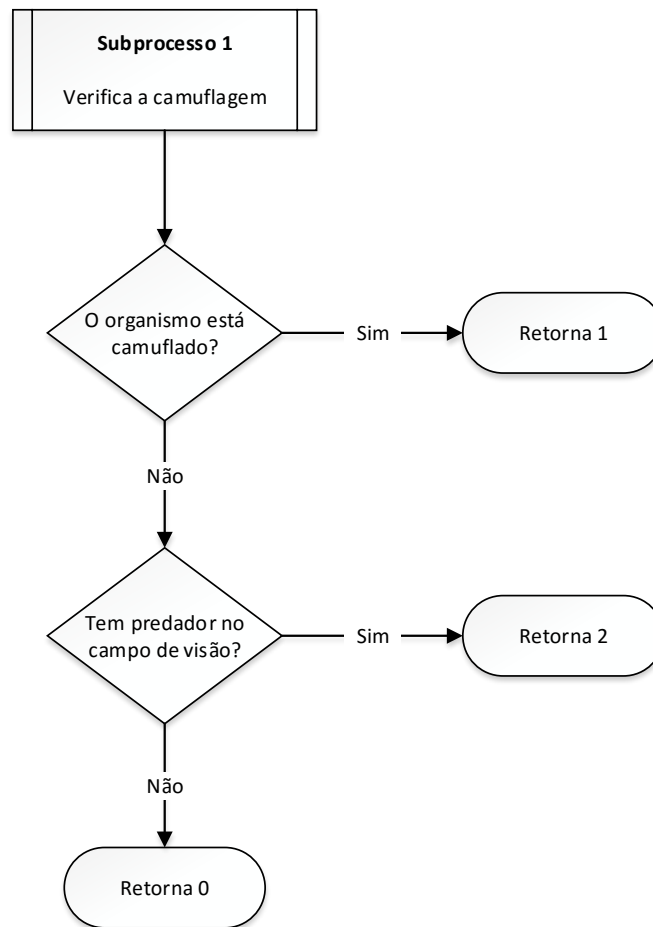


B.4 FLUXOGRAMAS PRESAS E PREDADORES

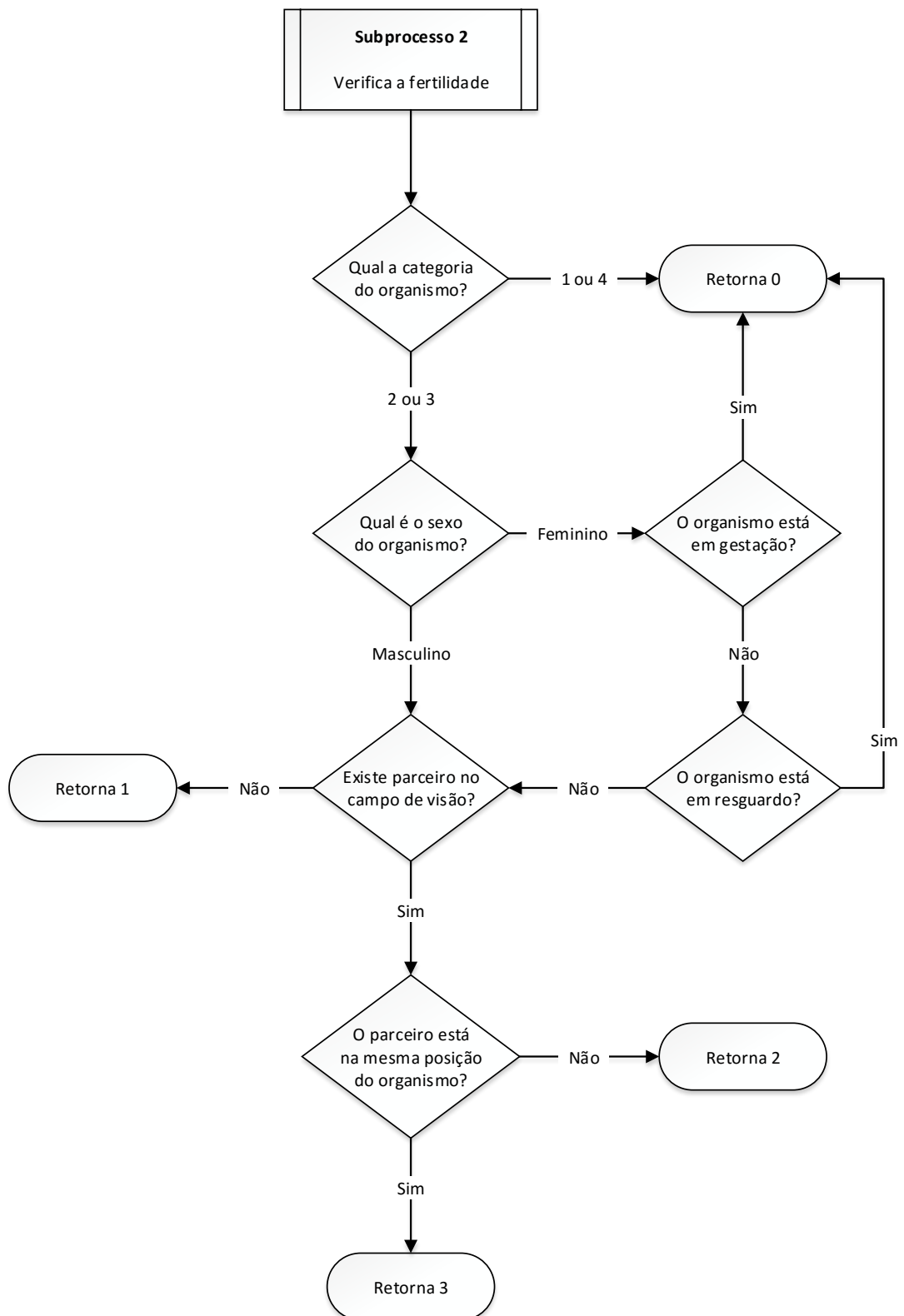
B.4.1 Fluxograma do ciclo de vida dos organismos presa e predador



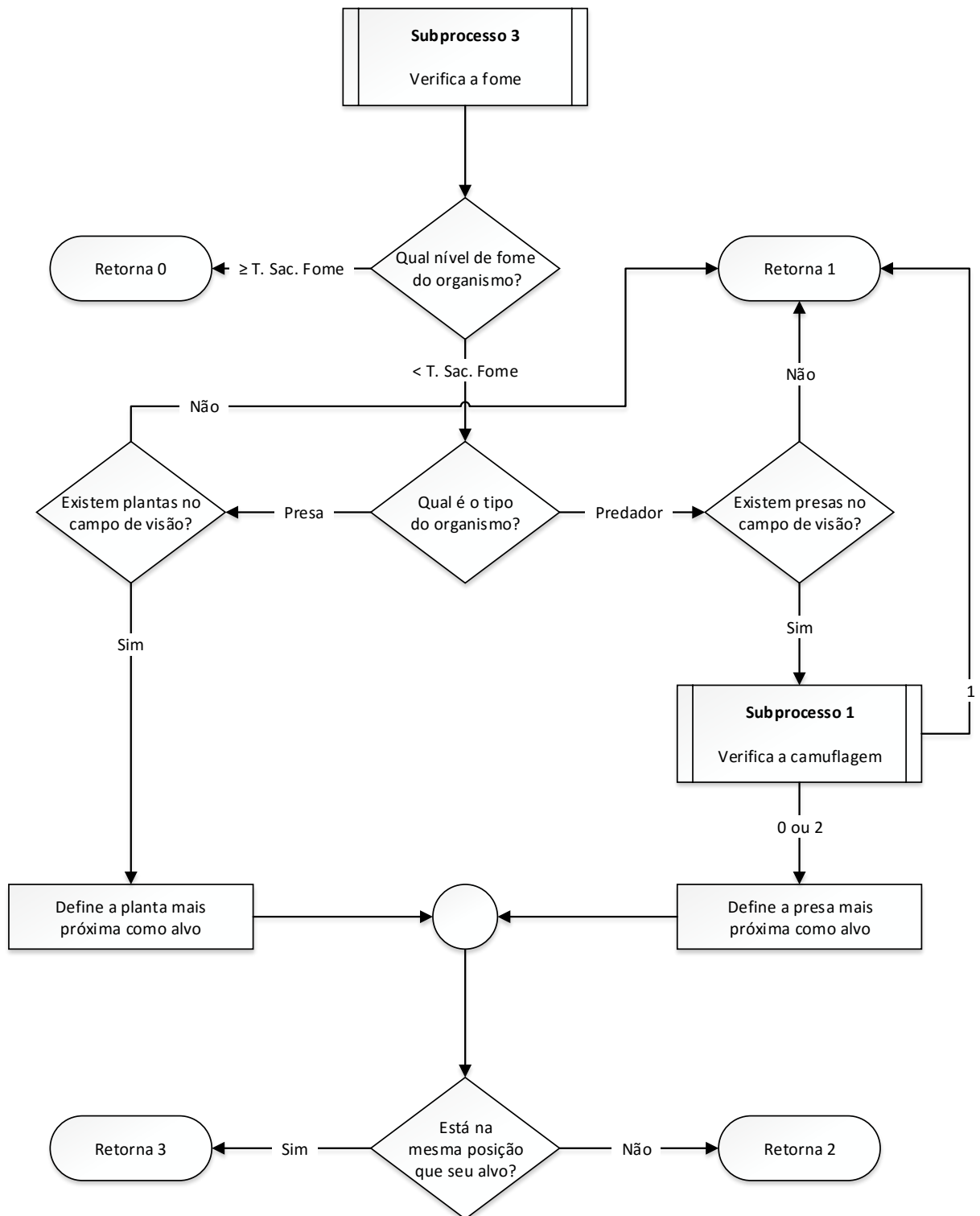
B.4.2 Fluxograma do subprocesso *Verifica a camuflagem*



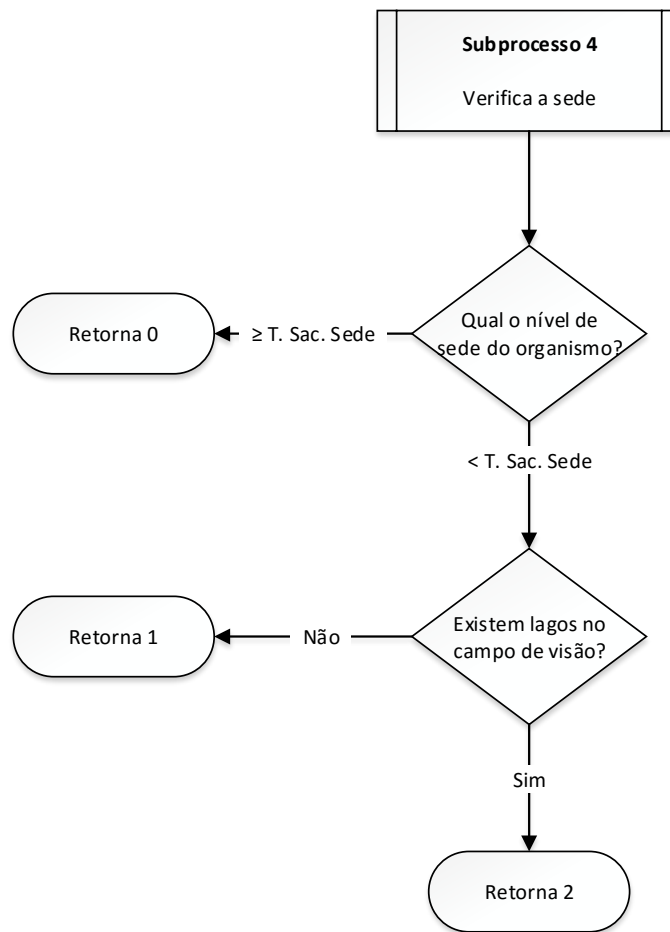
B.4.3 Fluxograma do subprocesso *Verifica a fertilidade*



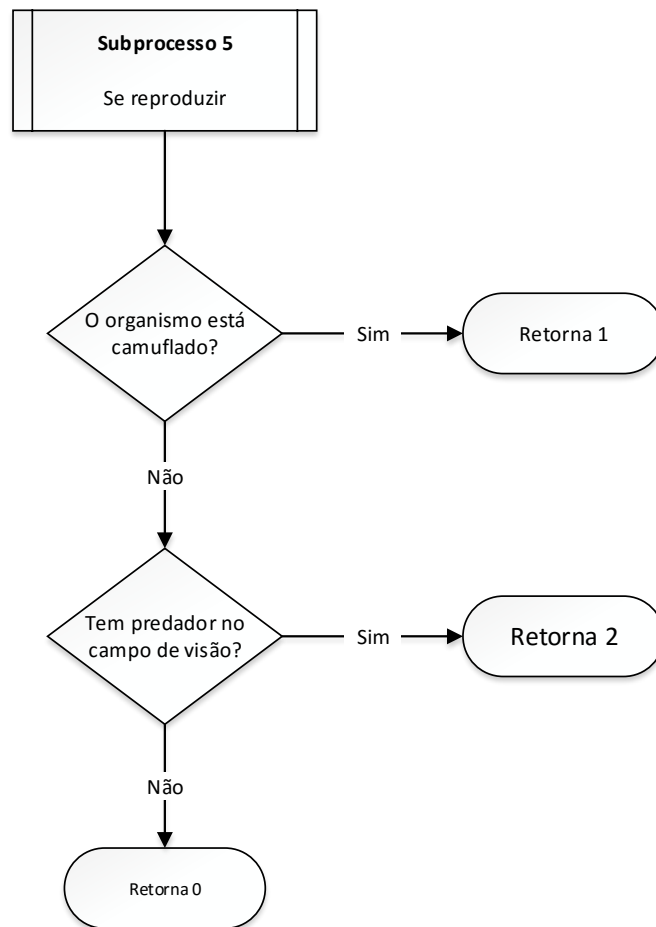
B.4.4 Fluxograma do subprocesso *Verifica a fome*



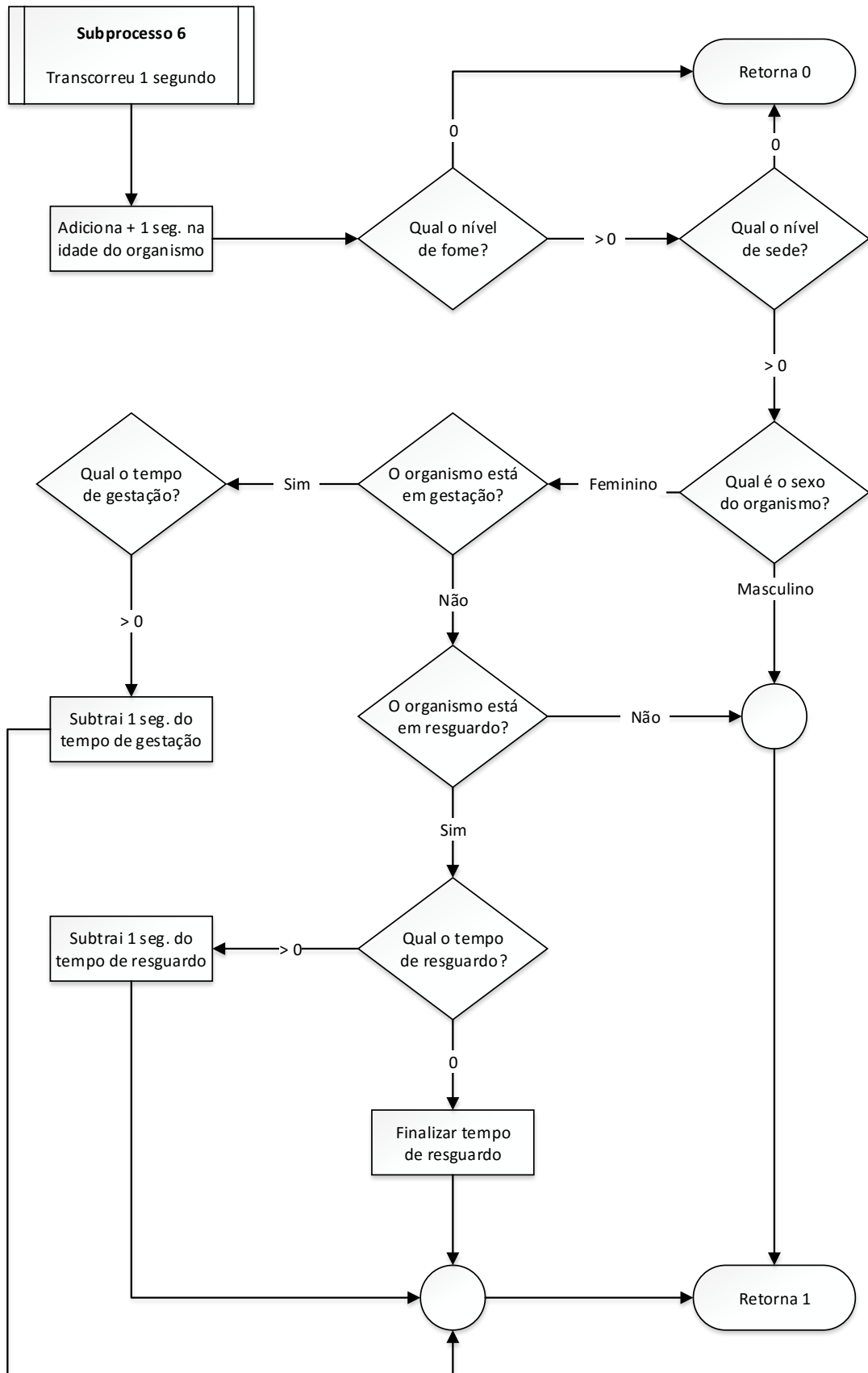
B.4.5 Fluxograma do subprocesso *Verifica a sede*



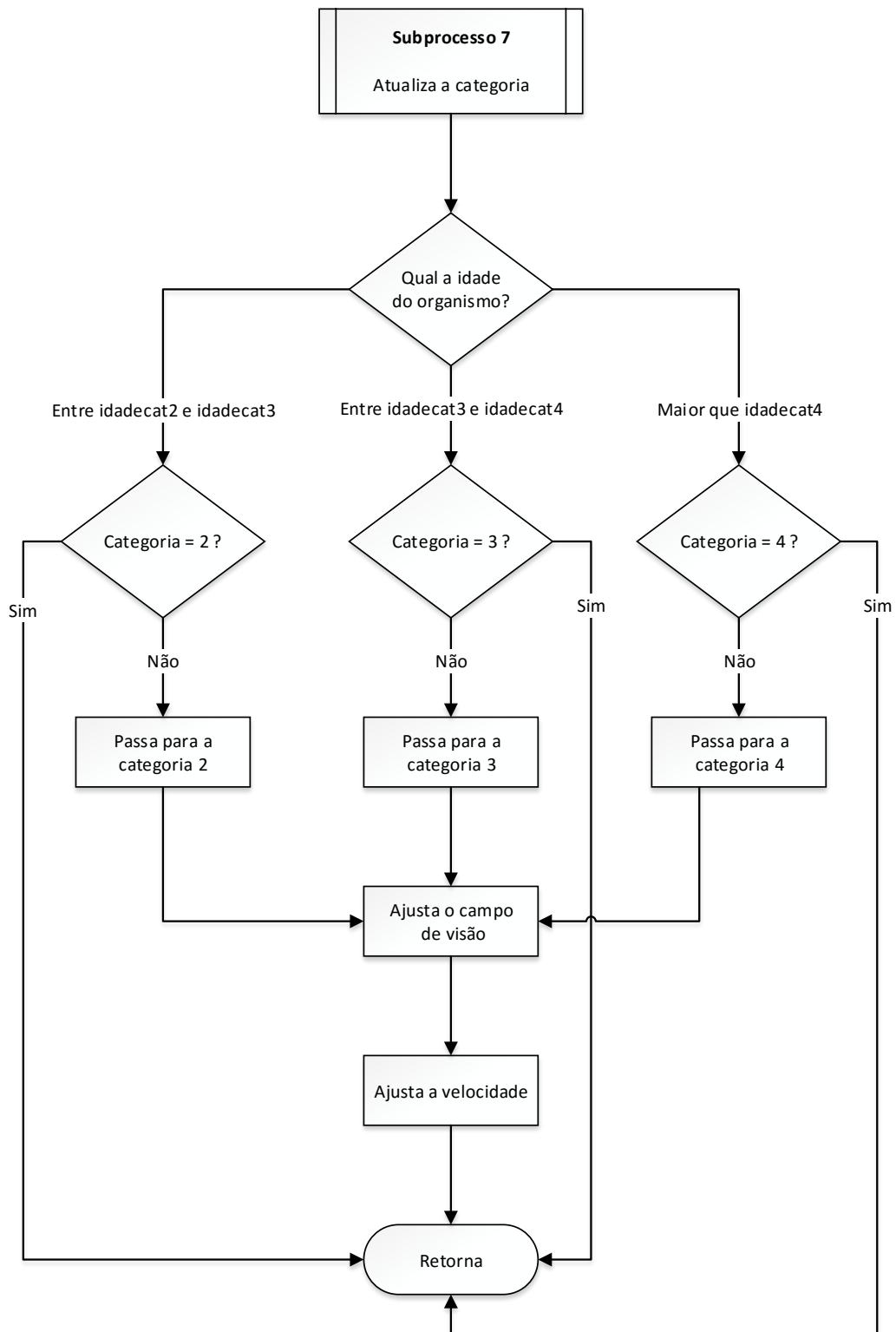
B.4.6 Fluxograma do subprocesso *Se reproduzir*



B.4.7 Fluxograma do subprocesso *Transcorreu 1 segundo*

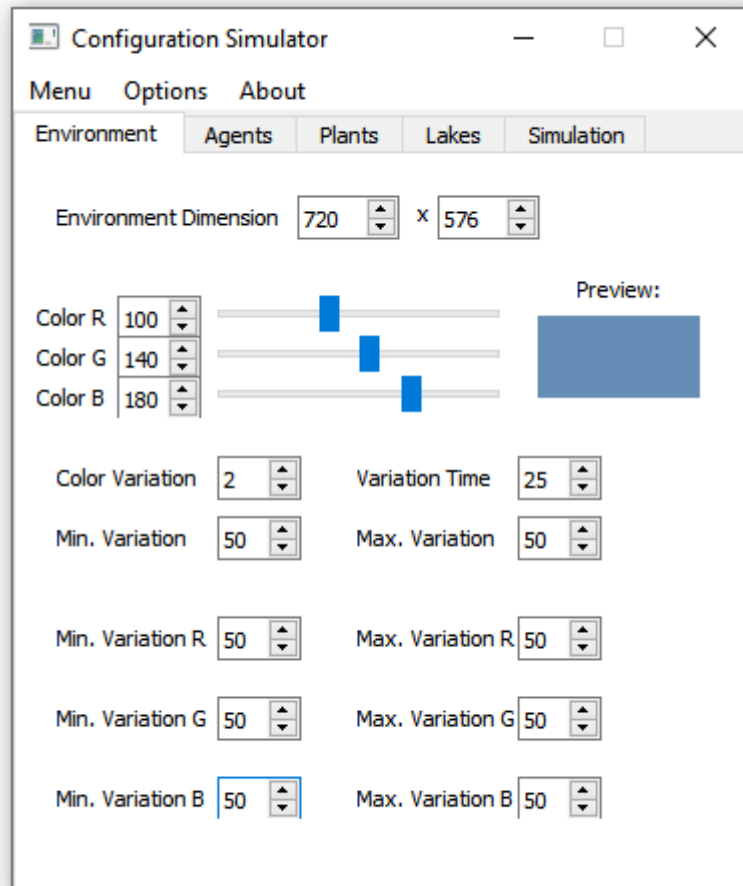


B.4.8 Fluxograma do subprocesso *Atualiza a categoria*

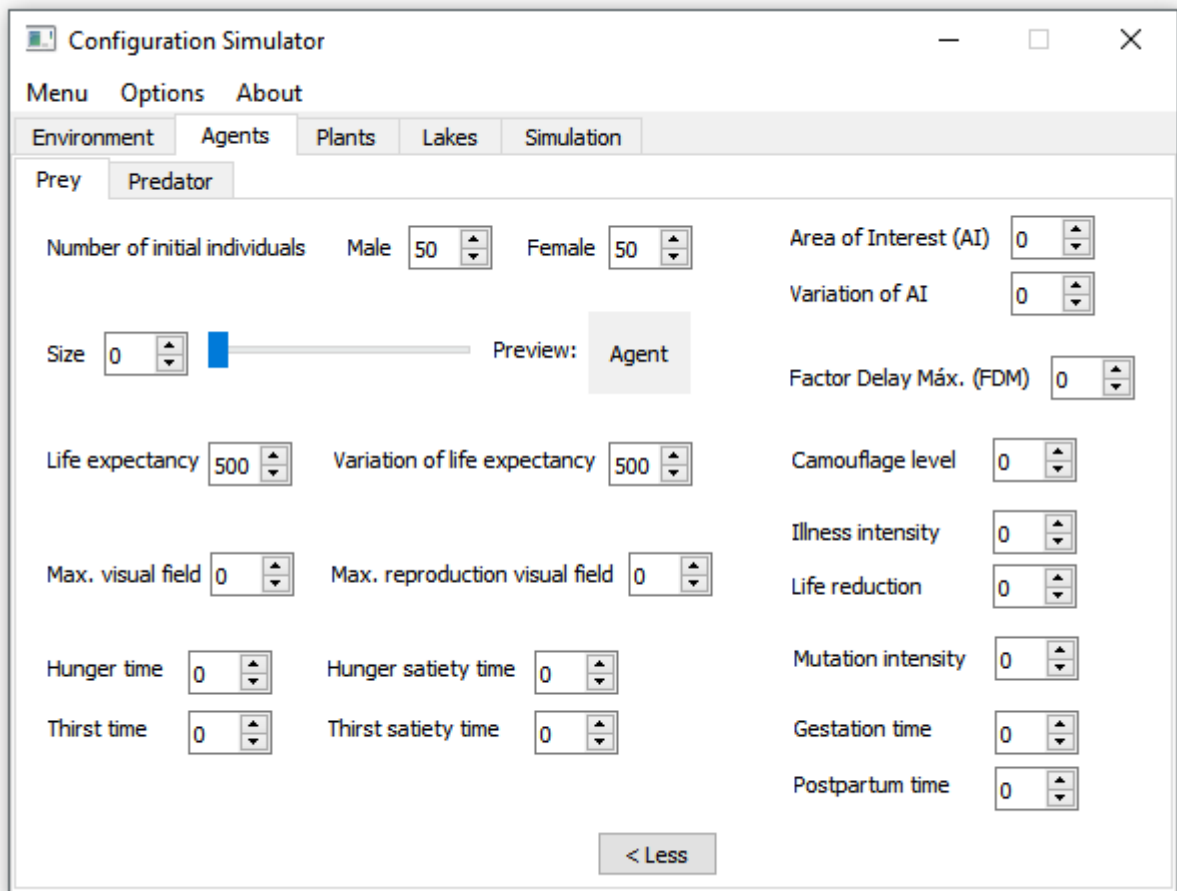


C. TELAS DO *SOFTWARE* DE CONFIGURAÇÃO

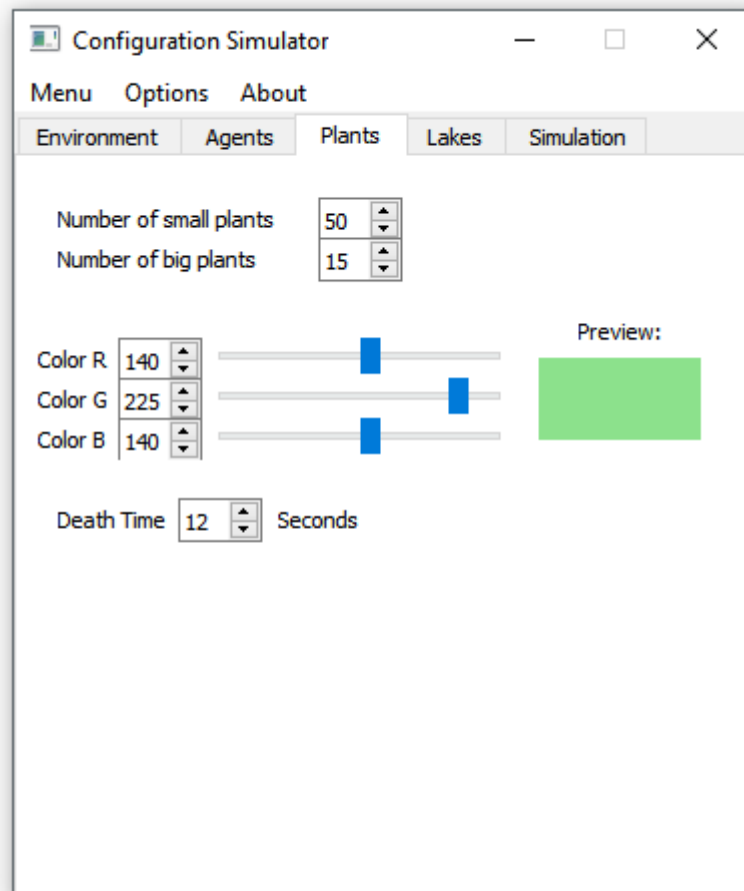
C.1 TELA DE CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE



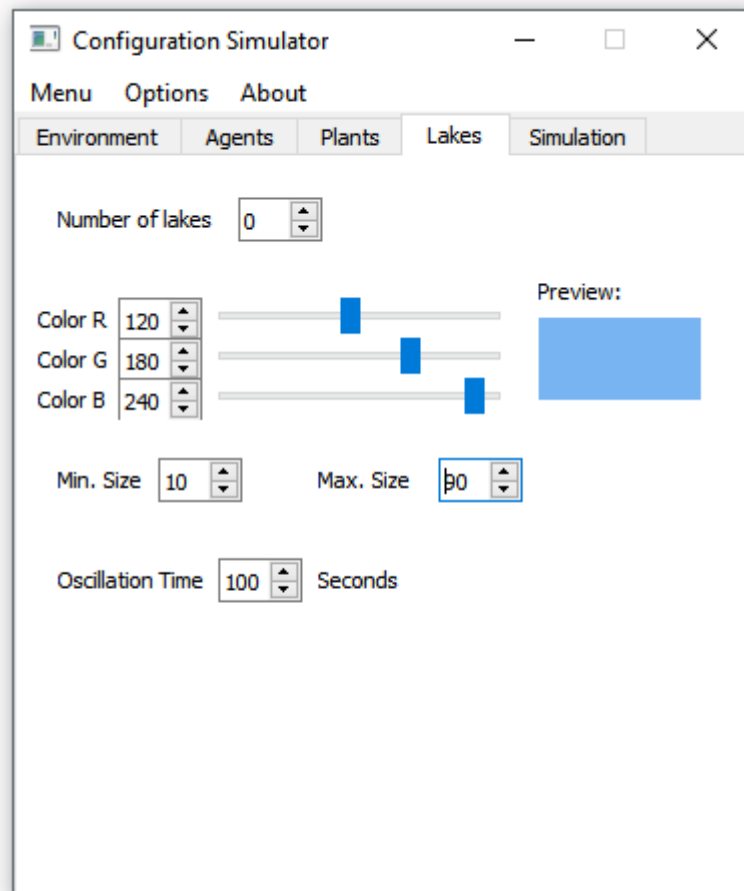
C.2 TELA DE CONFIGURAÇÃO DAS PRESAS E PREDADORES



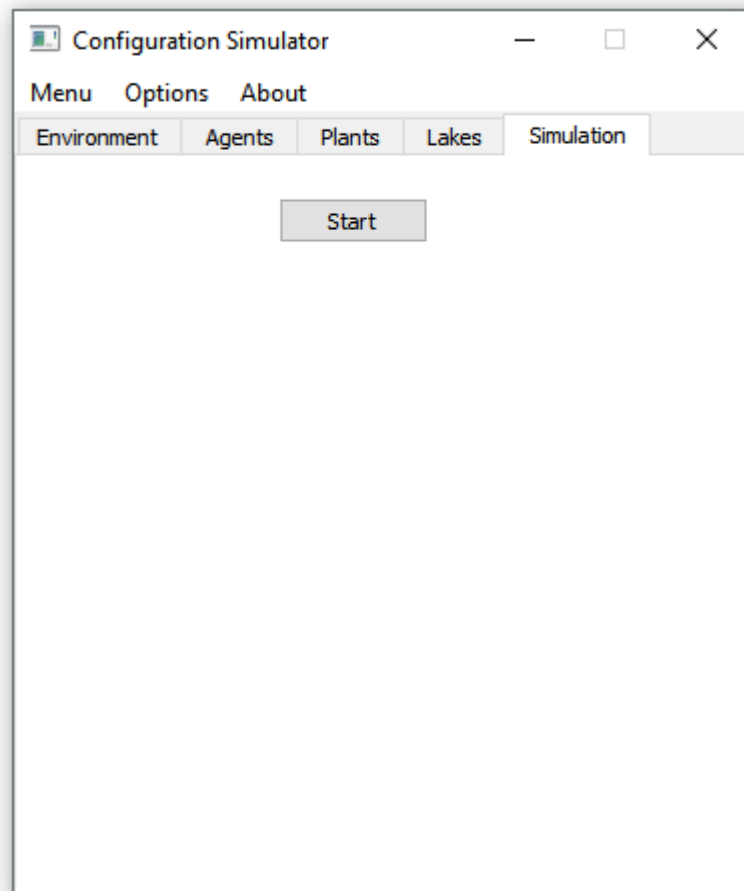
C.3 TELA DE CONFIGURAÇÃO DAS PLANTAS



C.4 TELA DE CONFIGURAÇÃO DOS LAGOS



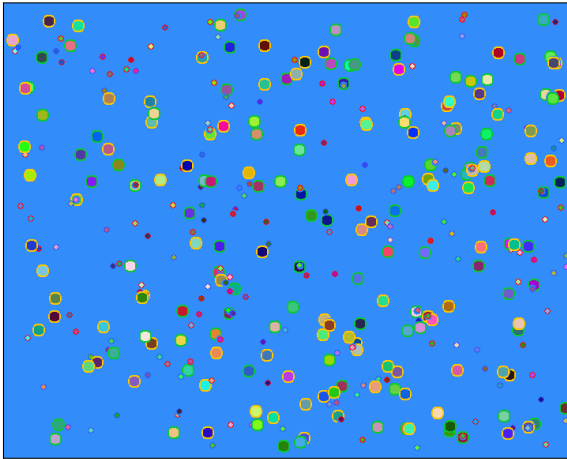
C.5 TELA DE INICIO DA SIMULAÇÃO



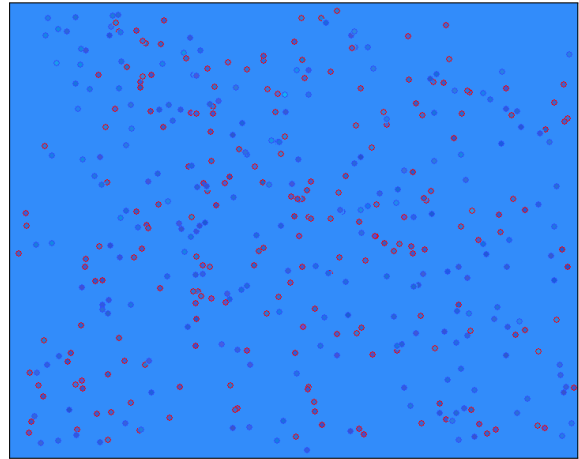
D. RESULTADOS EXPERIMENTAIS COMPLEMENTARES

D.1 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO I

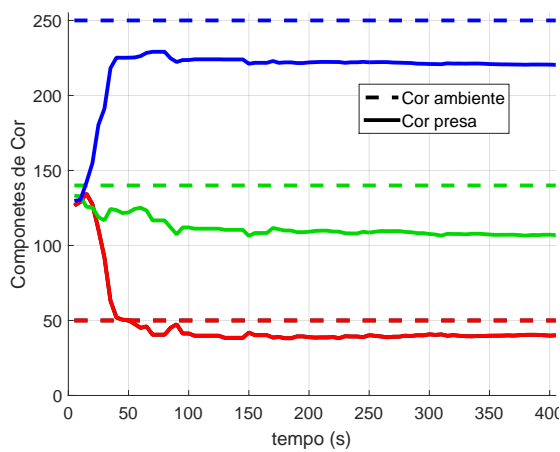
D.1.1 Resultados do experimento I.1.



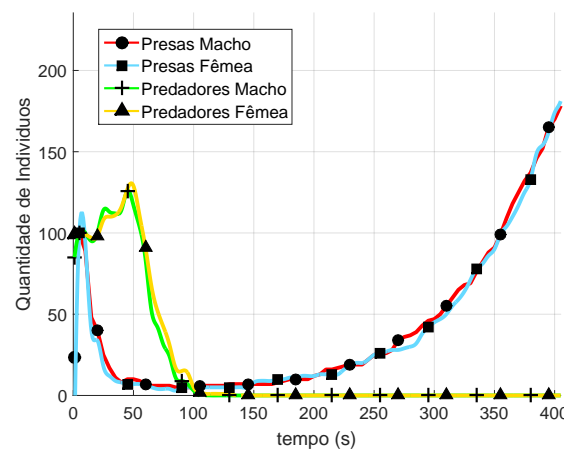
(a)



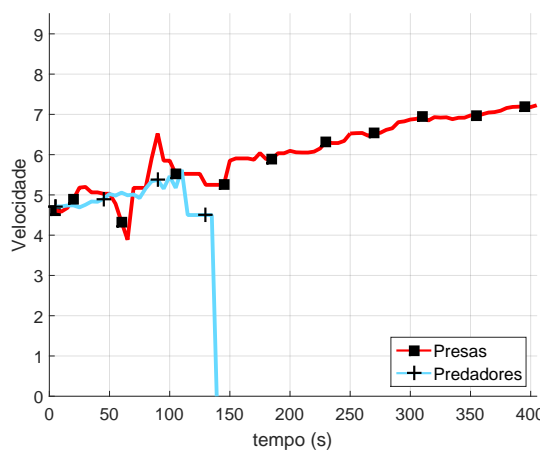
(b)



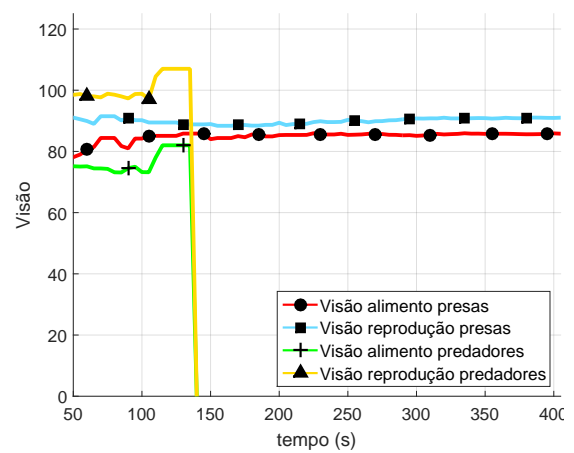
(c)



(d)

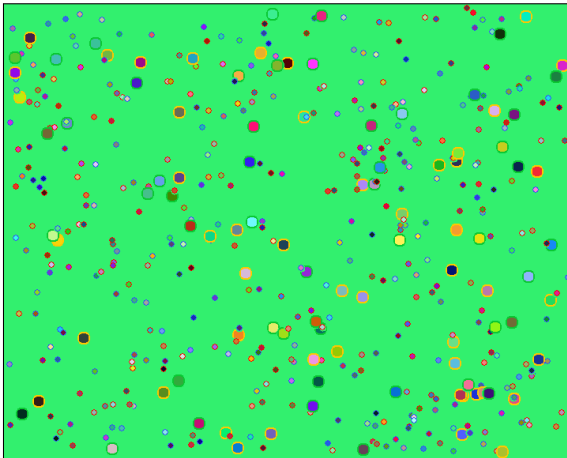


(e)

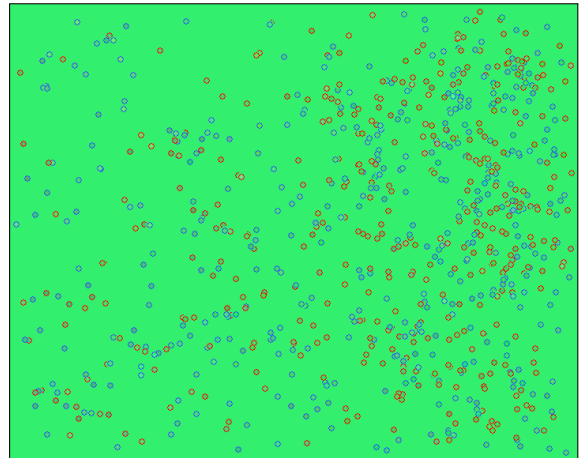


(f)

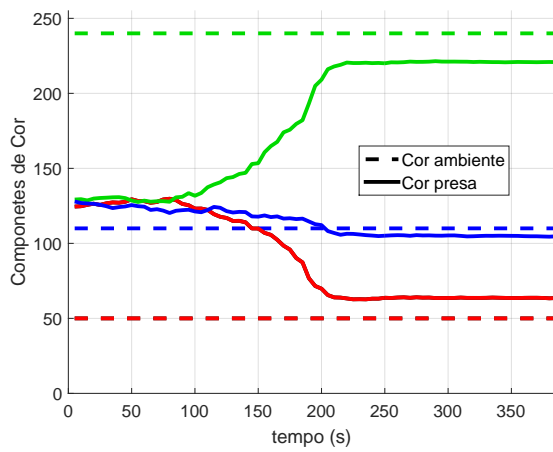
D.1.2 Resultados do experimento I.3.



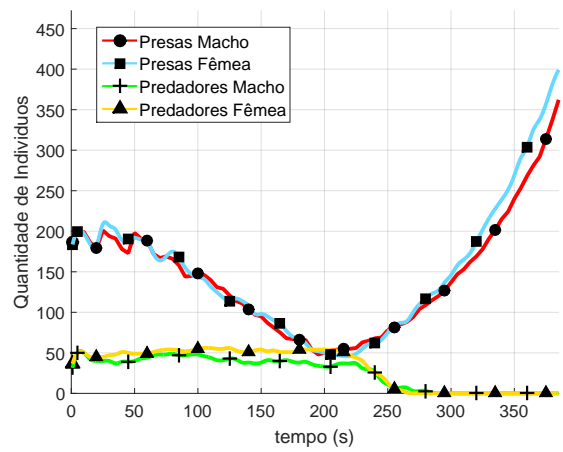
(a)



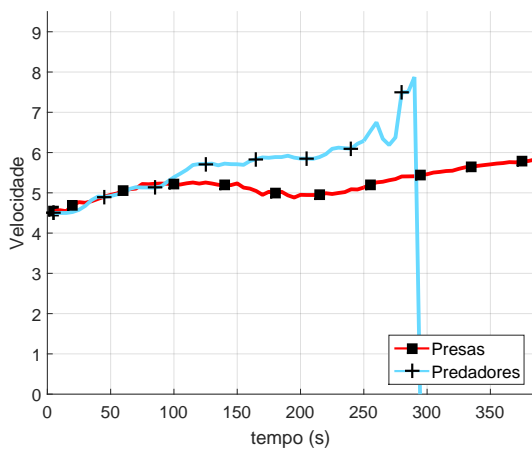
(b)



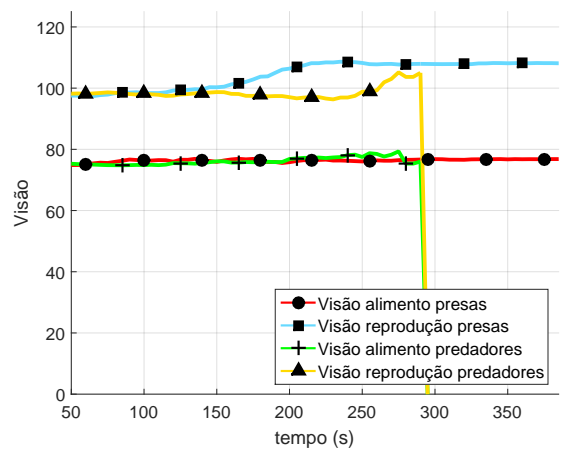
(c)



(d)

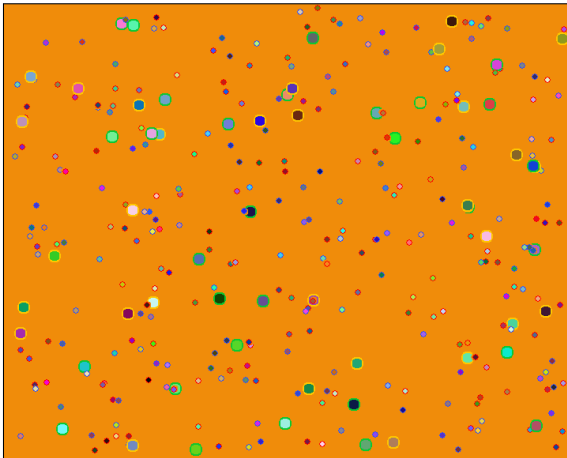


(e)

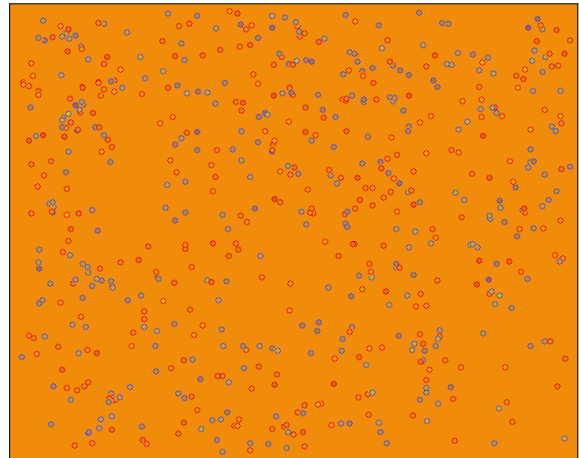


(f)

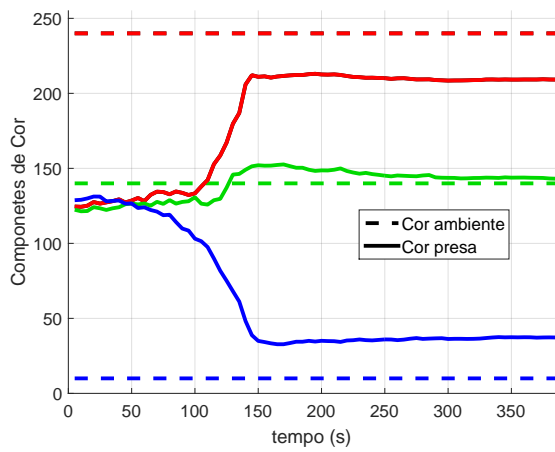
D.1.3 Resultados do experimento I.4.



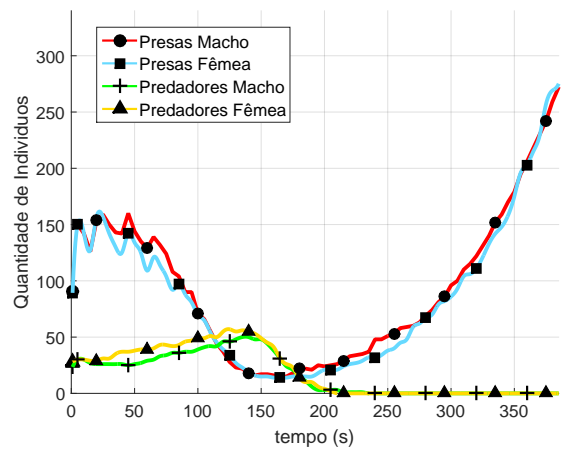
(a)



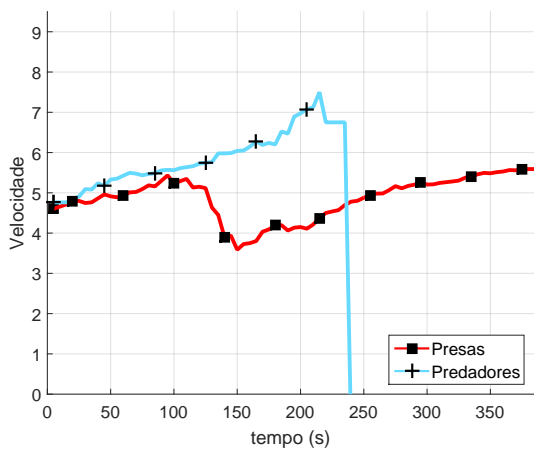
(b)



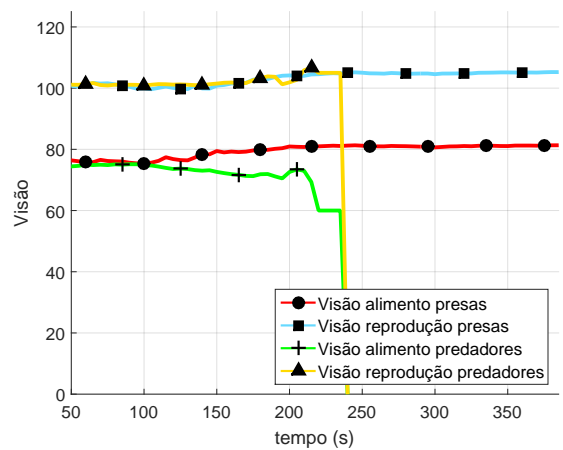
(c)



(d)



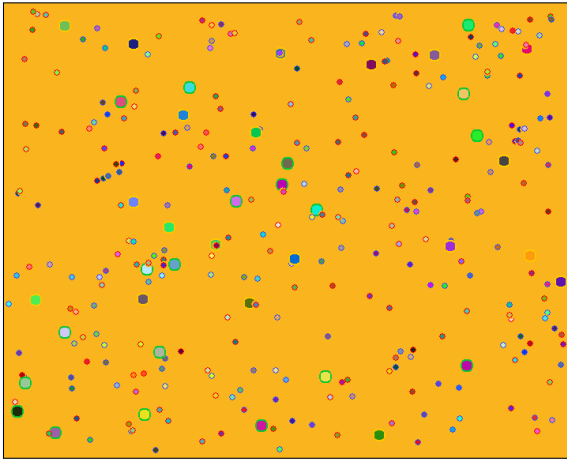
(e)



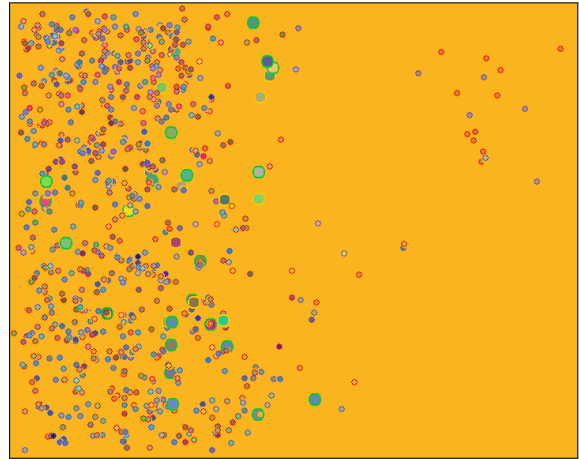
(f)

D.2 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO II

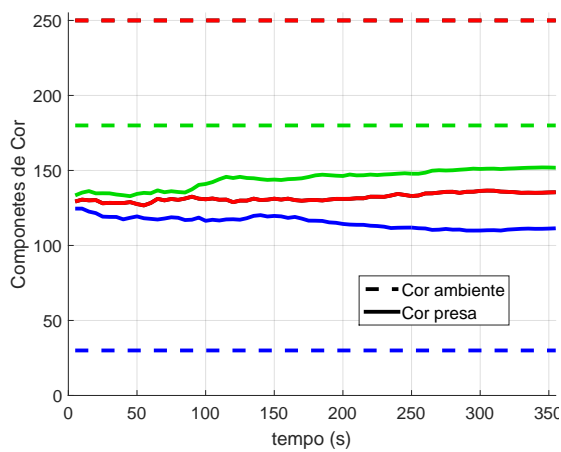
D.2.1 Resultados do experimento II.2.



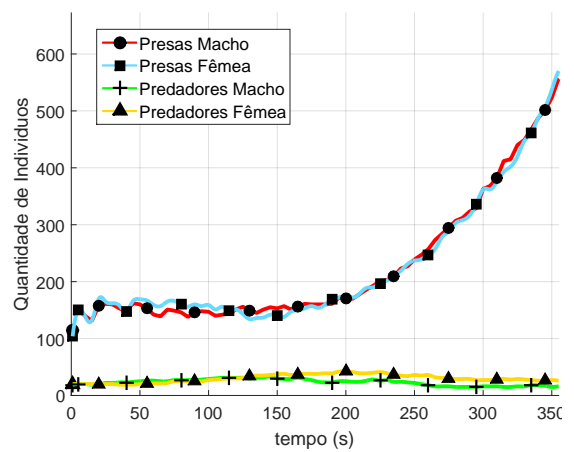
(a)



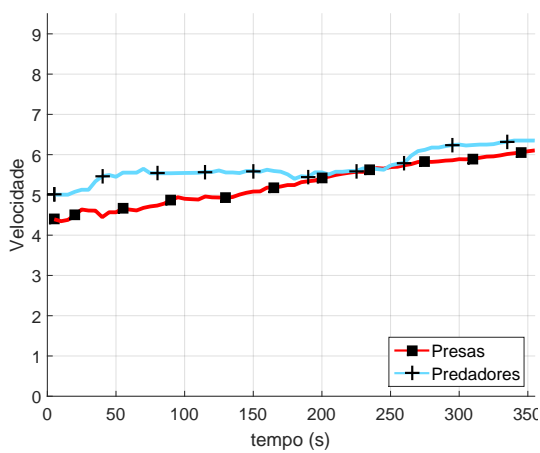
(b)



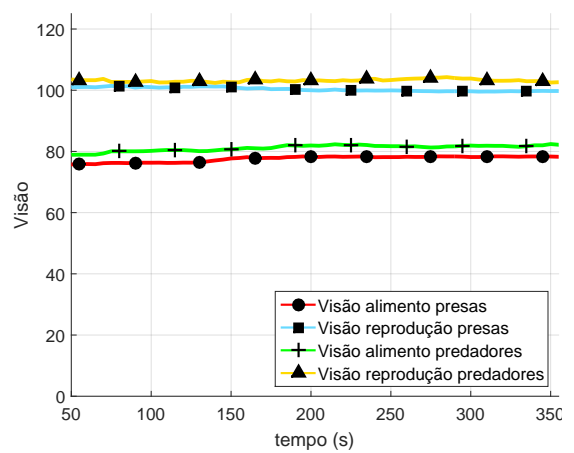
(c)



(d)

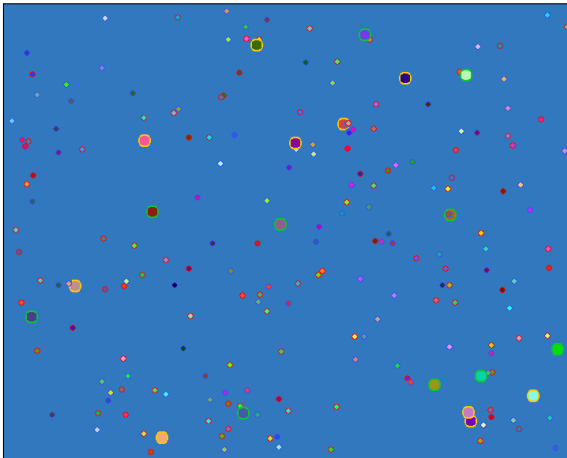


(e)

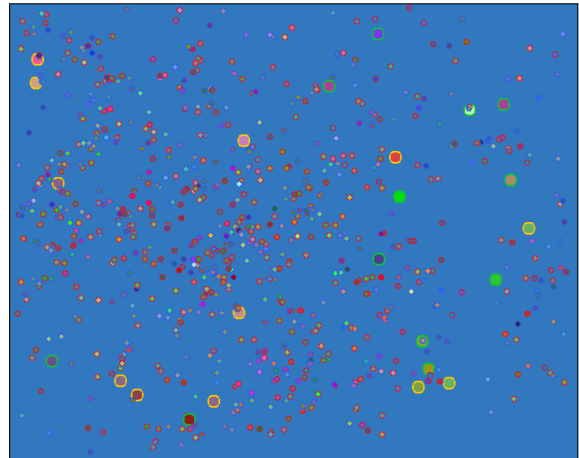


(f)

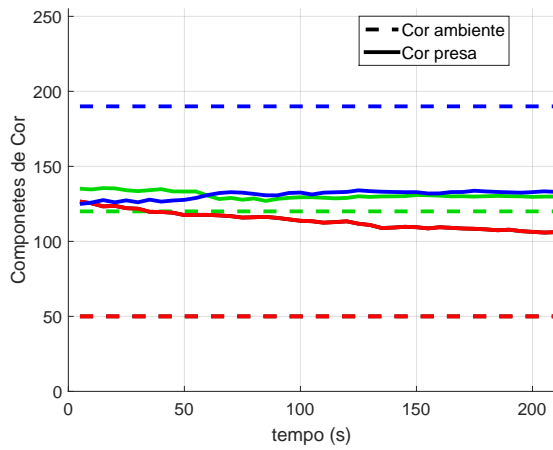
D.2.2 Resultados do experimento II.3.



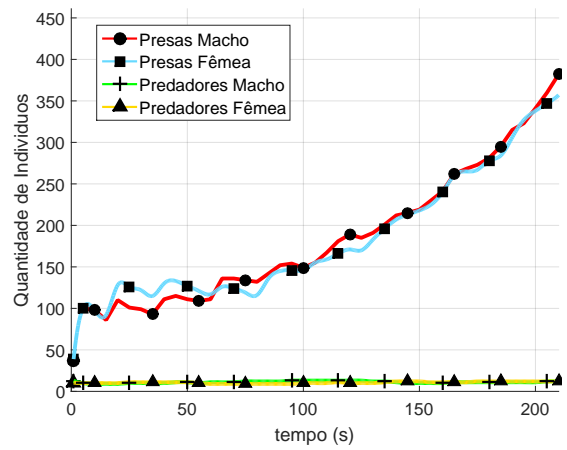
(a)



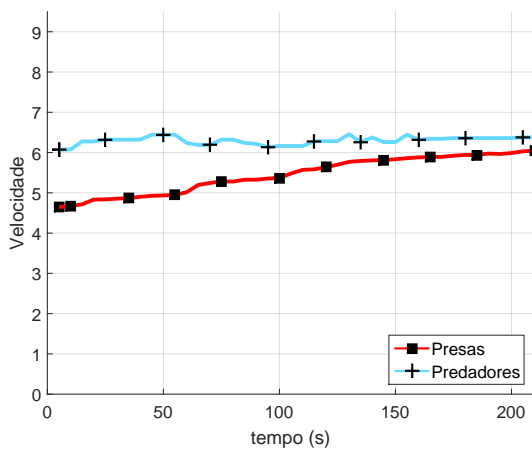
(b)



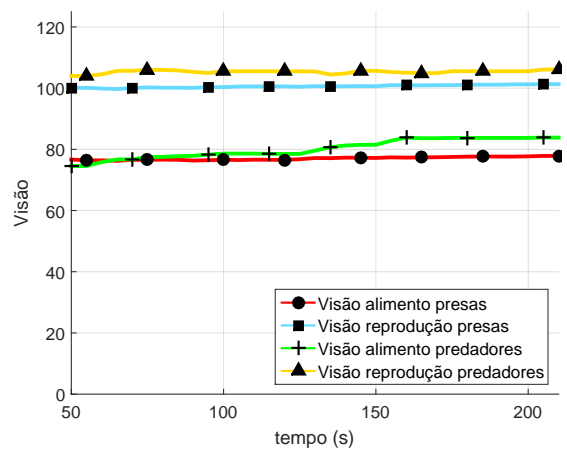
(c)



(d)

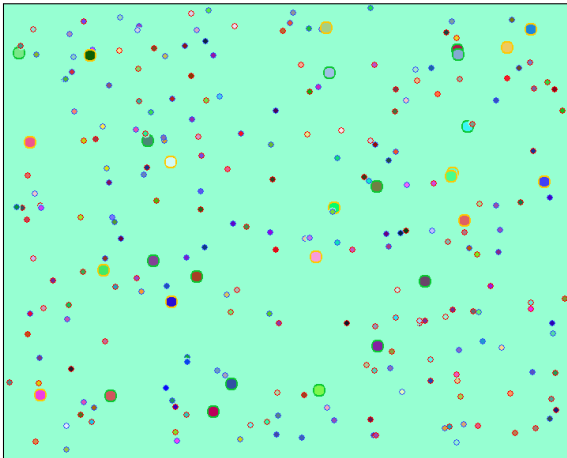


(e)

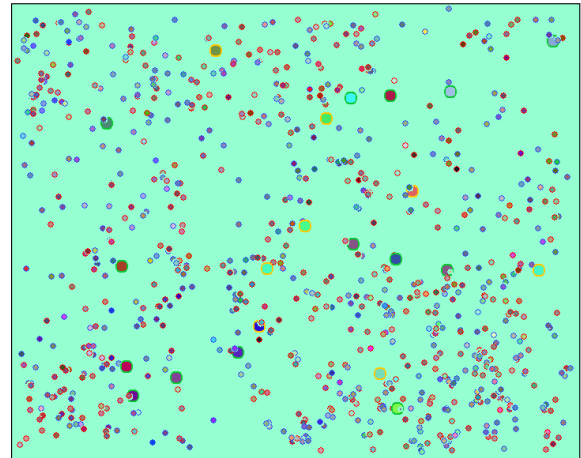


(f)

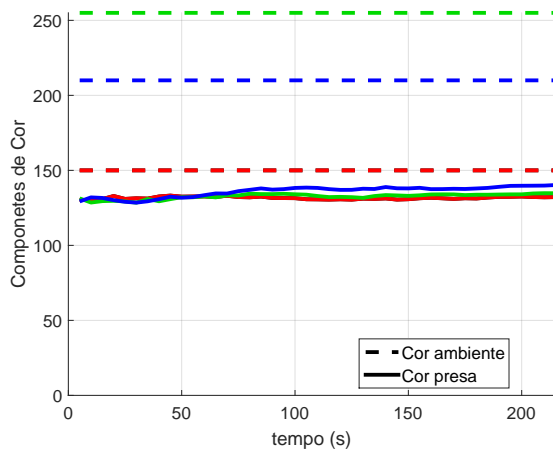
D.2.3 Resultados do experimento I.4.



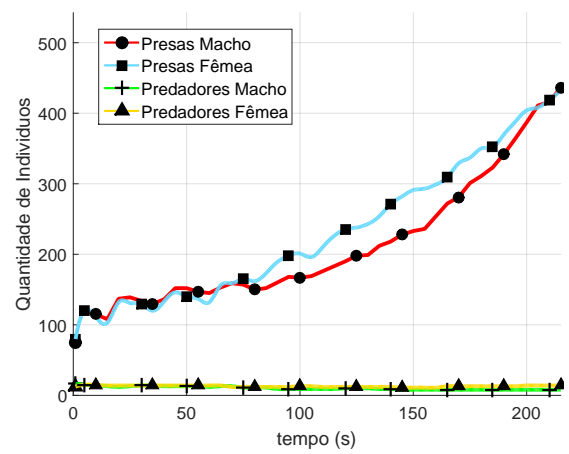
(a)



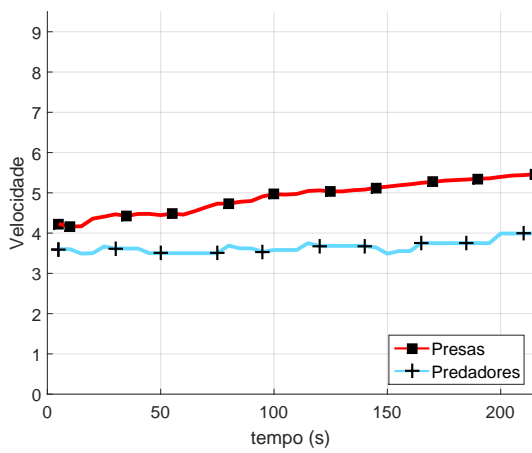
(b)



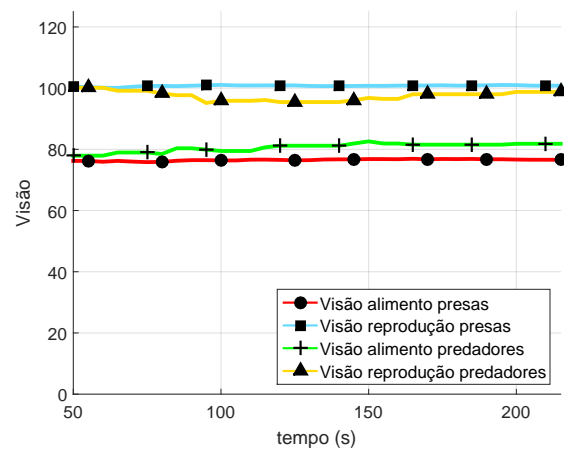
(c)



(d)



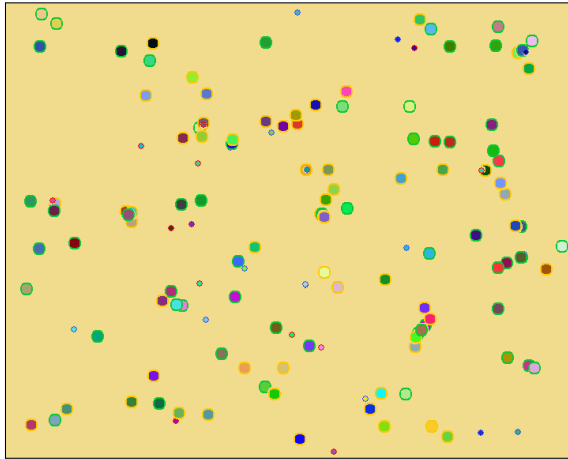
(e)



(f)

D.3 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO III

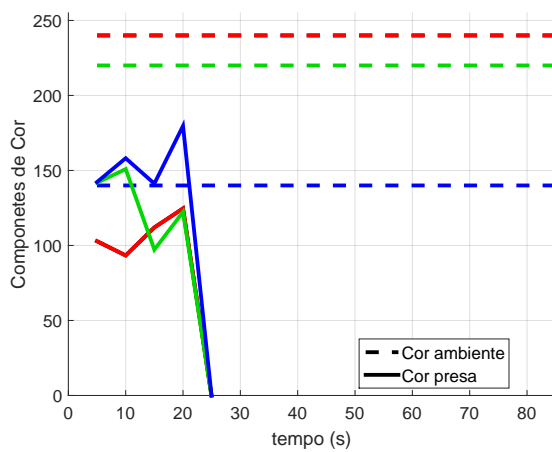
D.3.1 Resultados do experimento III.2.



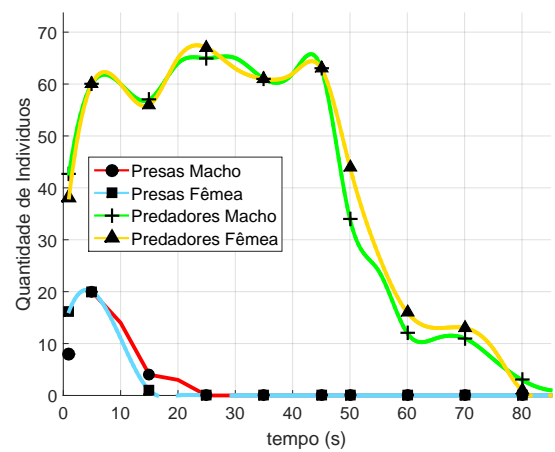
(a)



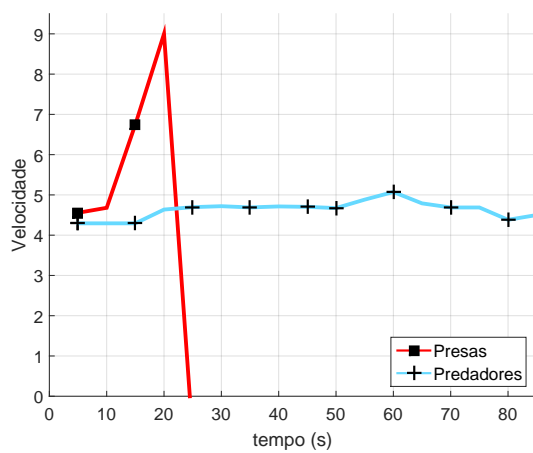
(b)



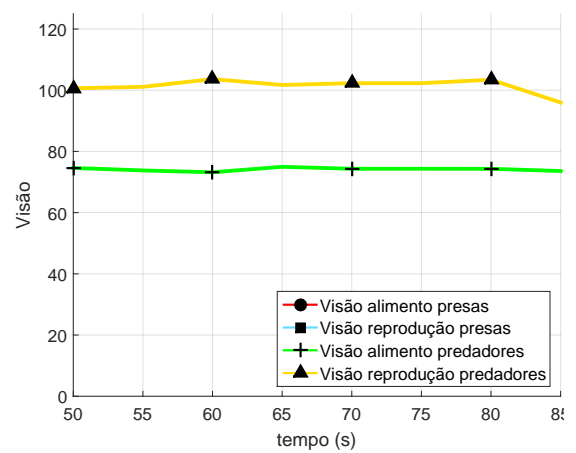
(c)



(d)

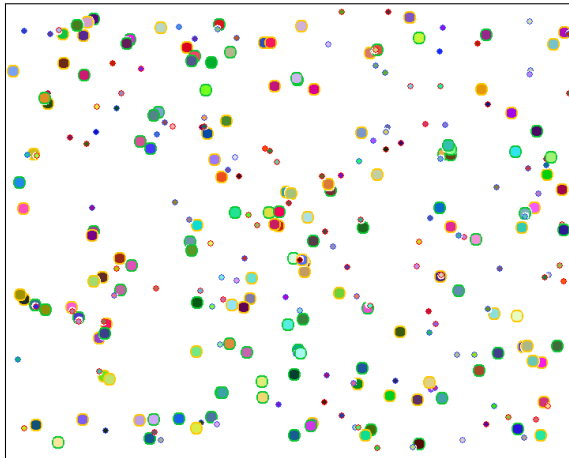


(e)

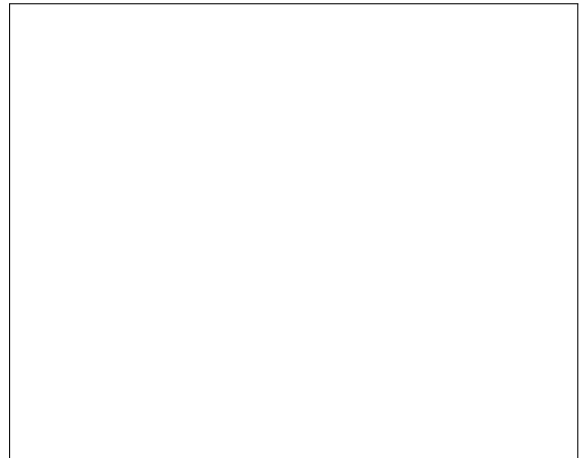


(f)

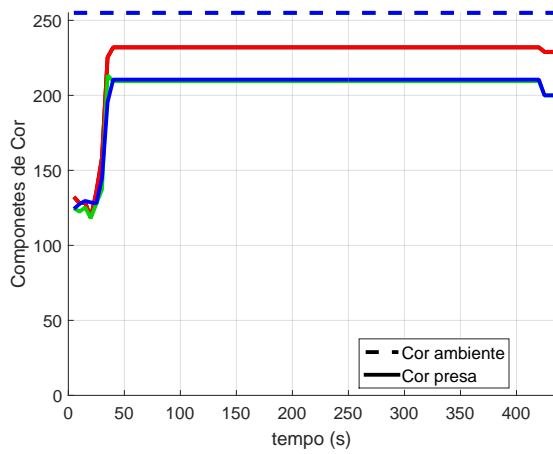
D.3.2 Resultados do experimento III.3.



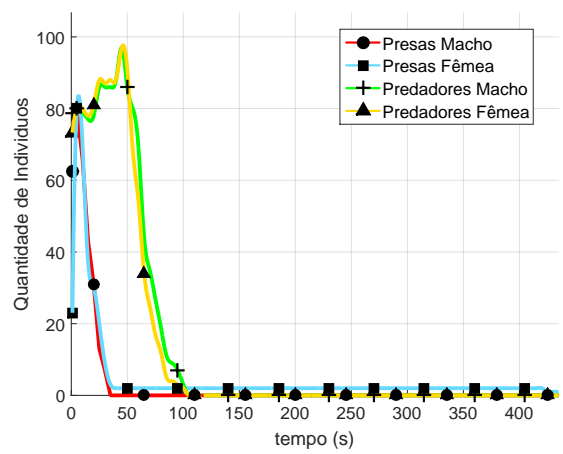
(a)



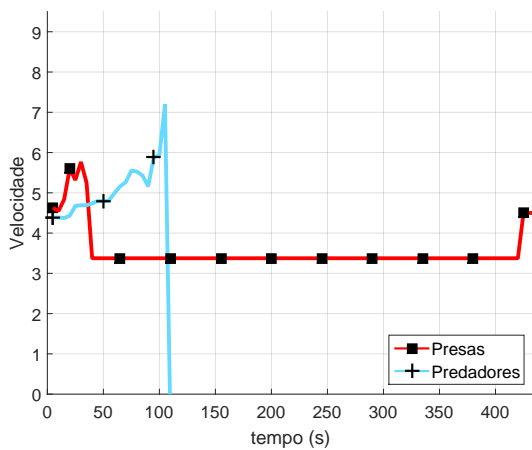
(b)



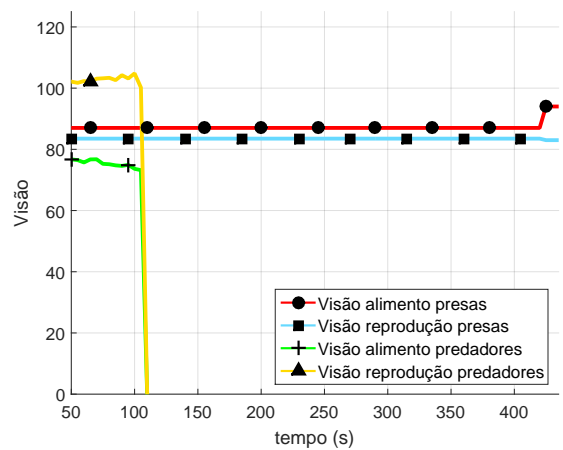
(c)



(d)

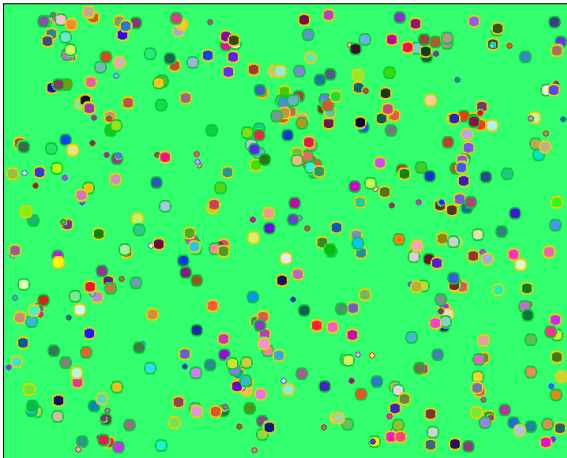


(e)



(f)

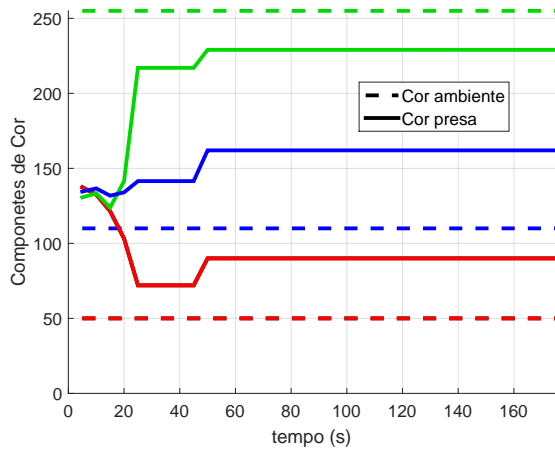
D.3.3 Resultados do experimento III.4.



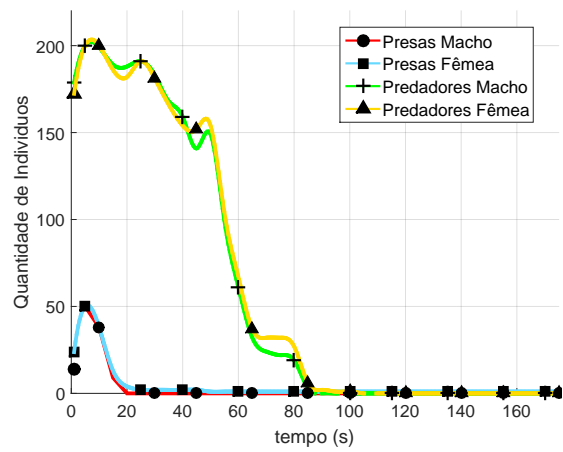
(a)



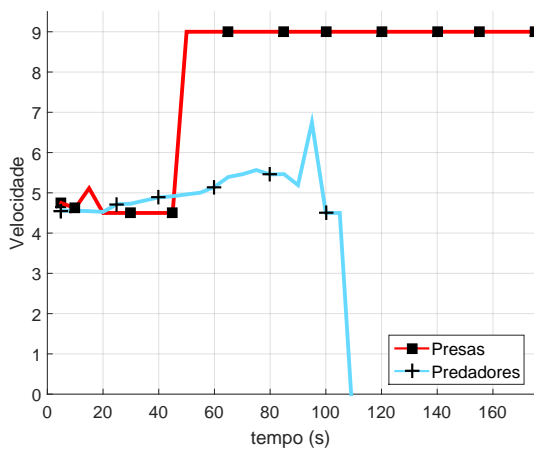
(b)



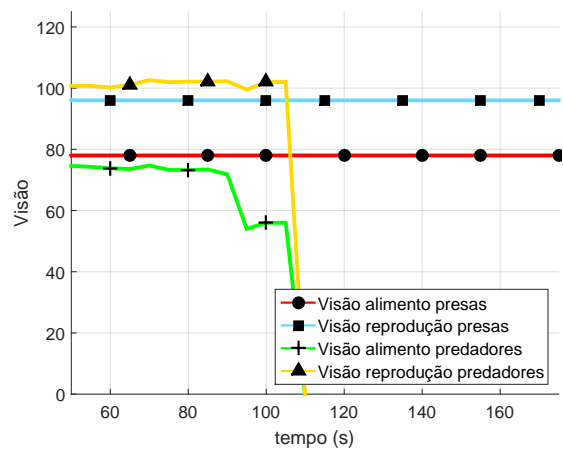
(c)



(d)



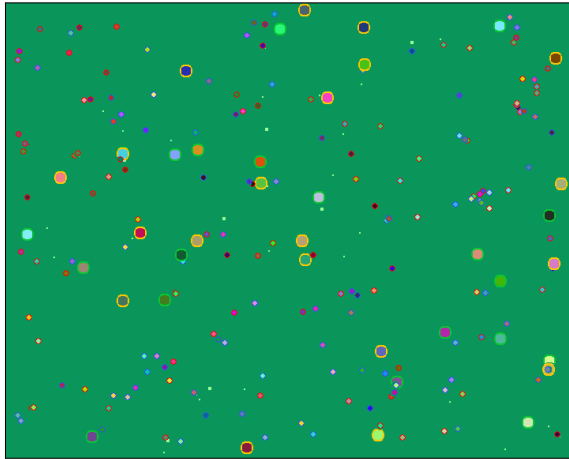
(e)



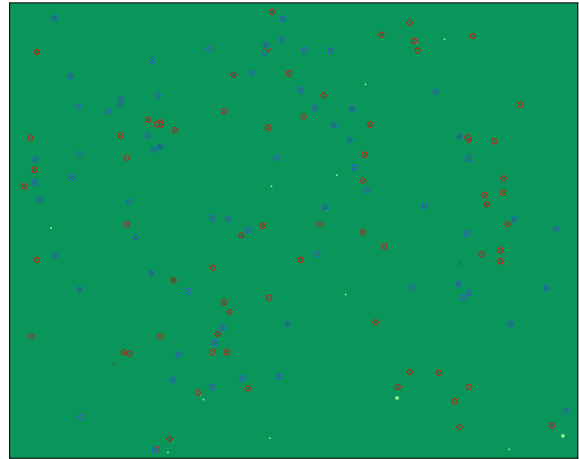
(f)

D.4 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO IV

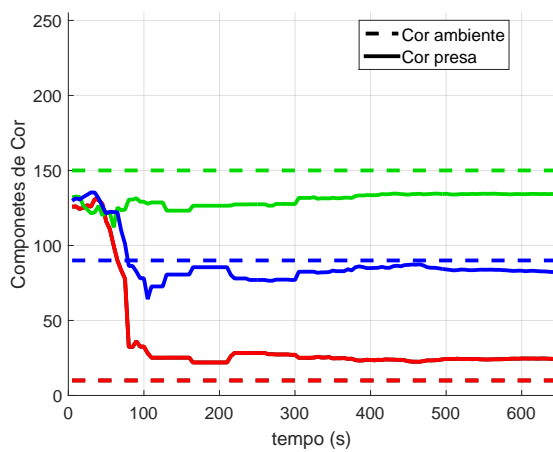
D.4.1 Resultados do experimento IV.1.



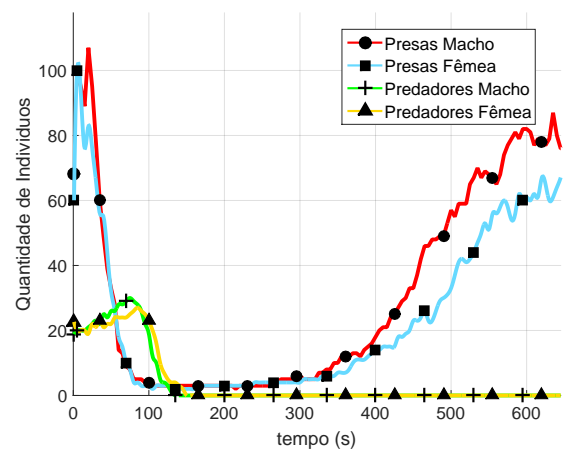
(a)



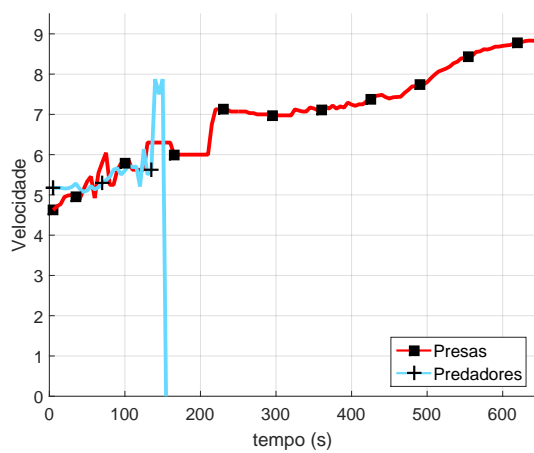
(b)



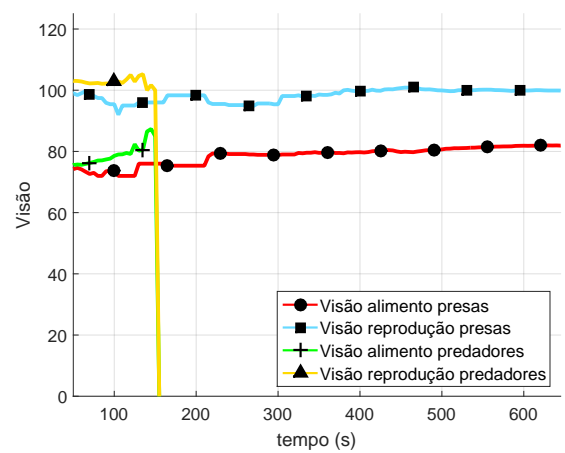
(c)



(d)

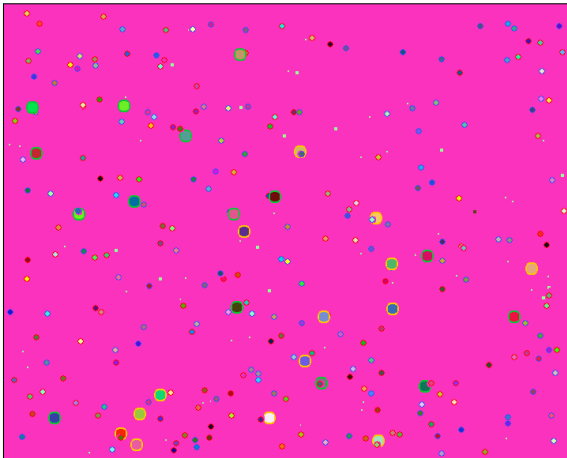


(e)

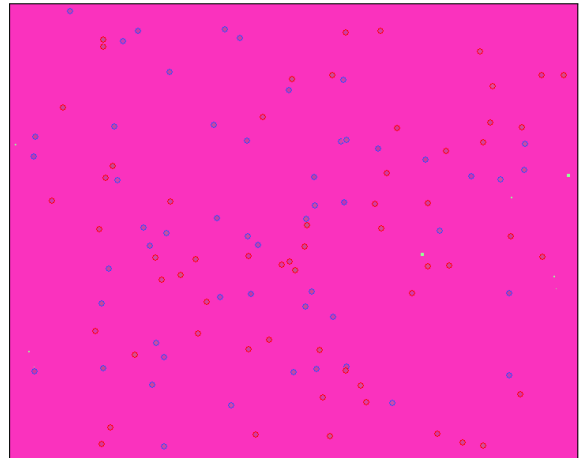


(f)

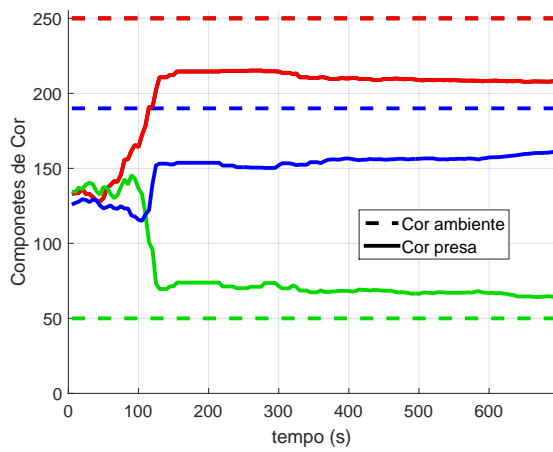
D.4.2 Resultados do experimento IV.2.



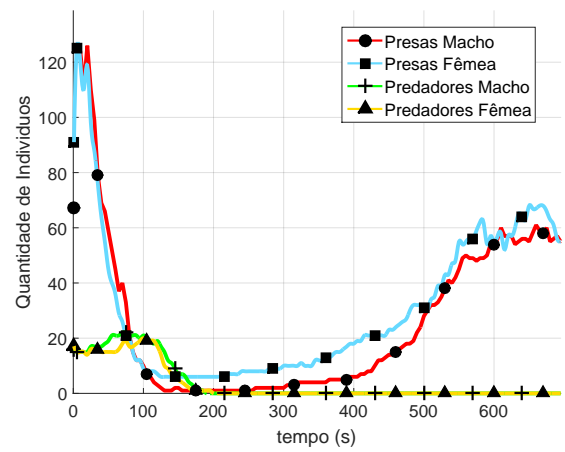
(a)



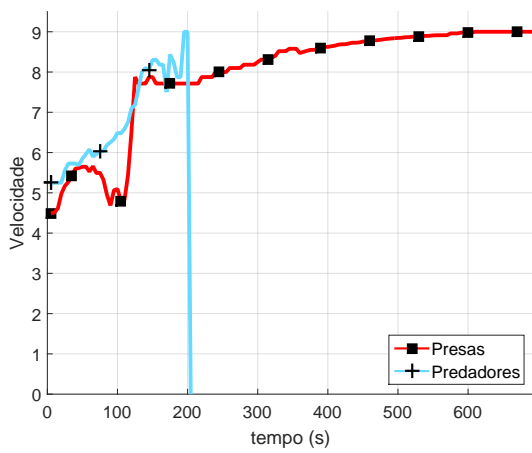
(b)



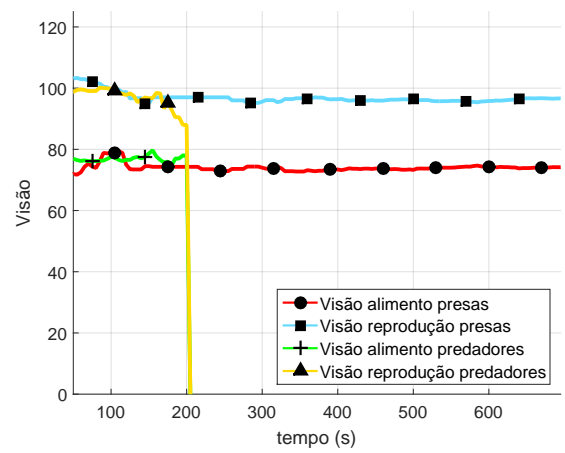
(c)



(d)

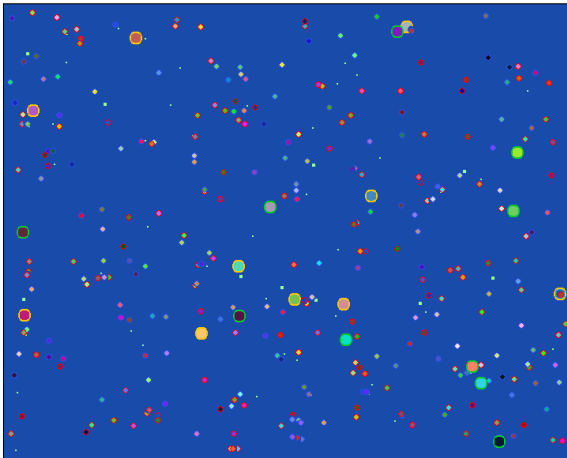


(e)

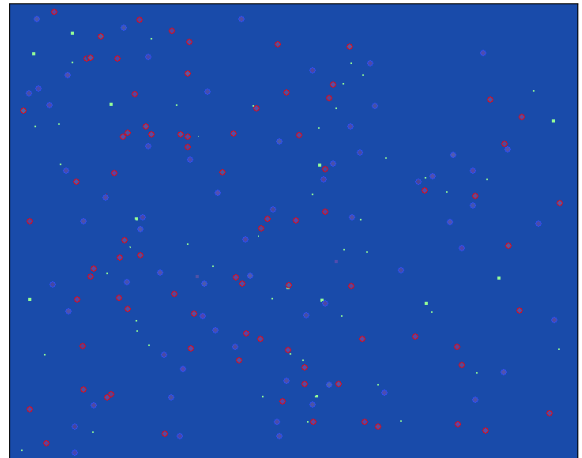


(f)

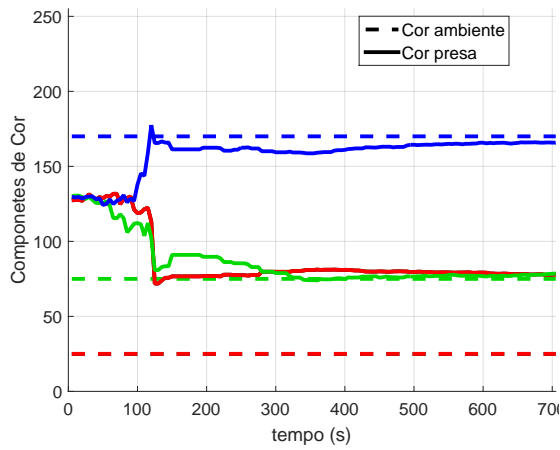
D.4.3 Resultados do experimento IV.3.



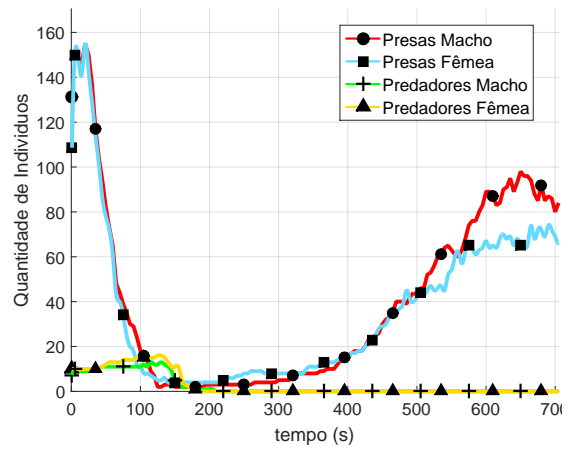
(a)



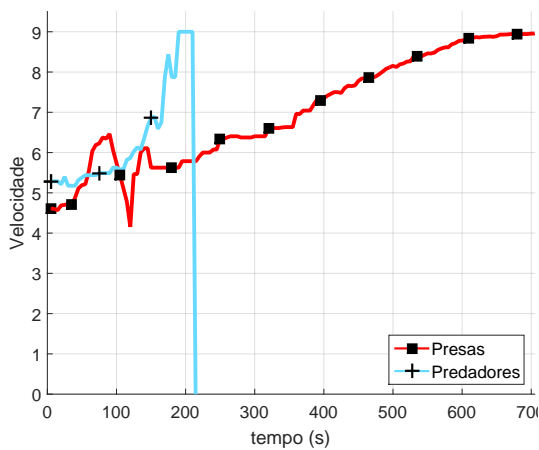
(b)



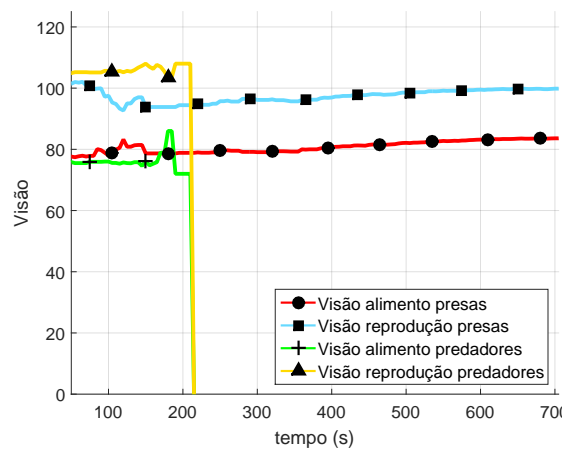
(c)



(d)

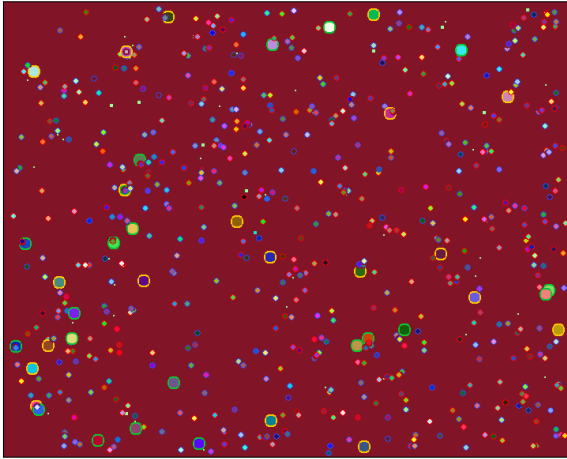


(e)

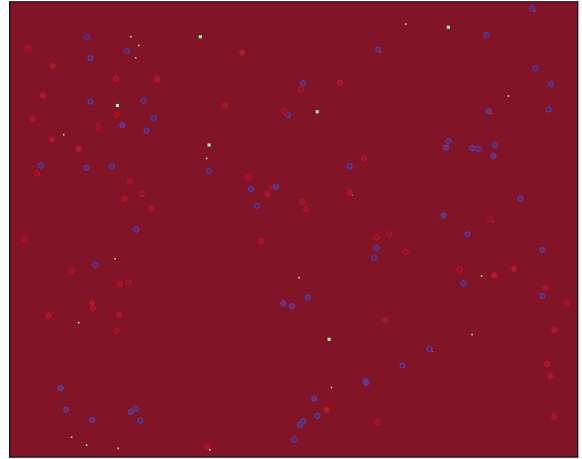


(f)

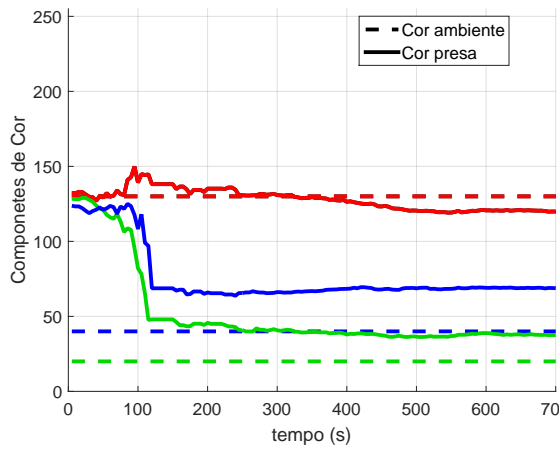
D.4.4 Resultados do experimento IV.4.



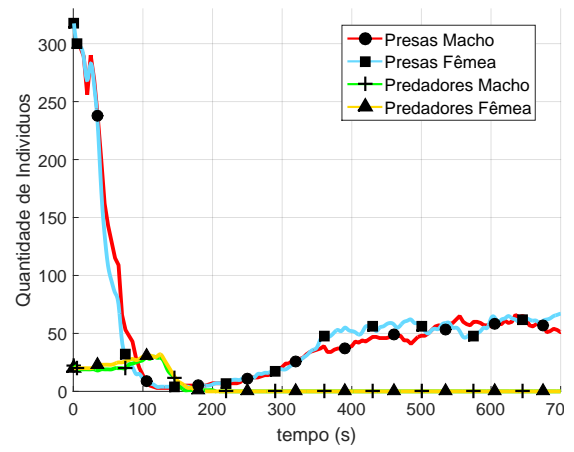
(a)



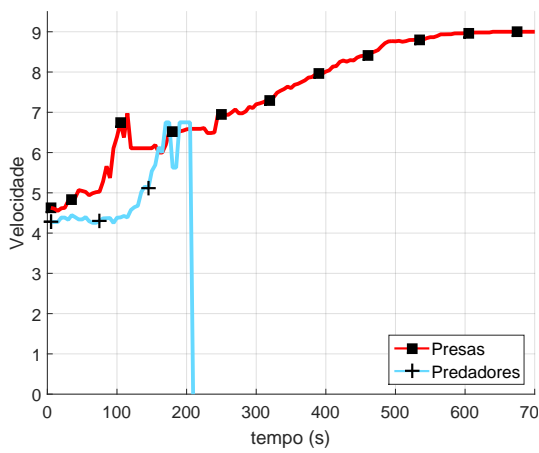
(b)



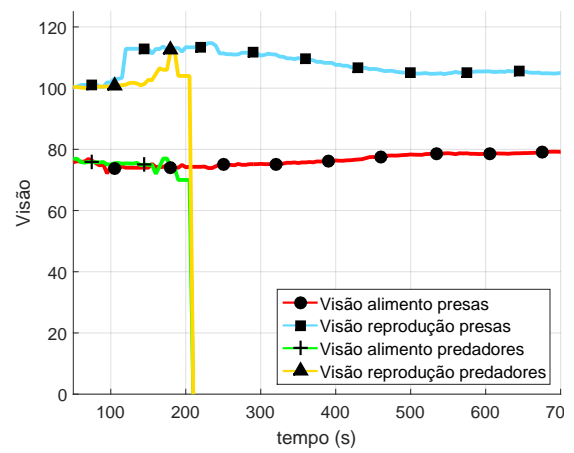
(c)



(d)

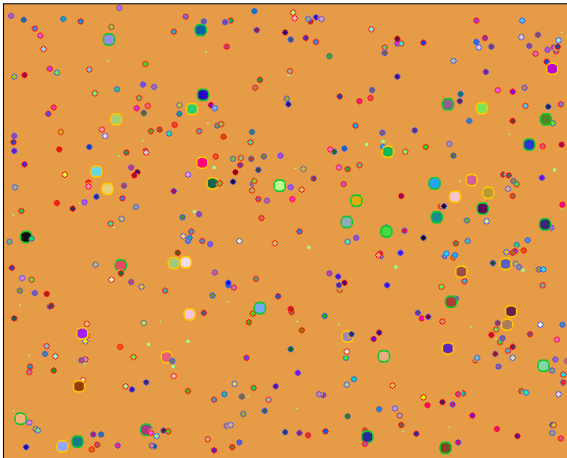


(e)

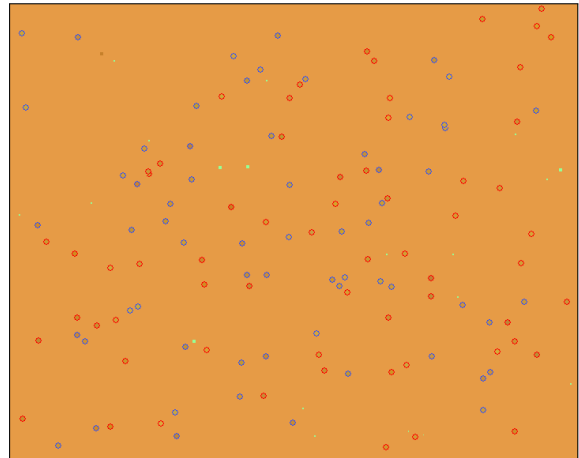


(f)

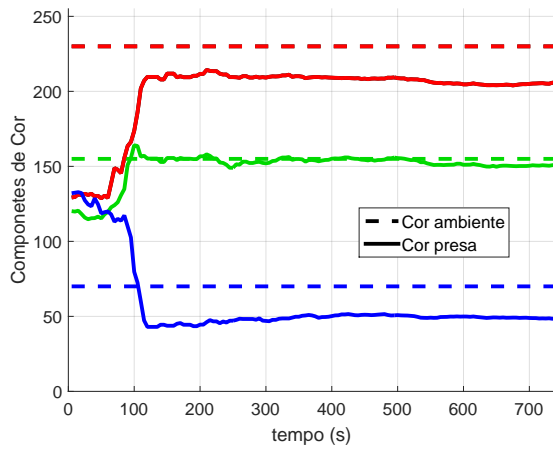
D.4.5 Resultados do experimento IV.5.



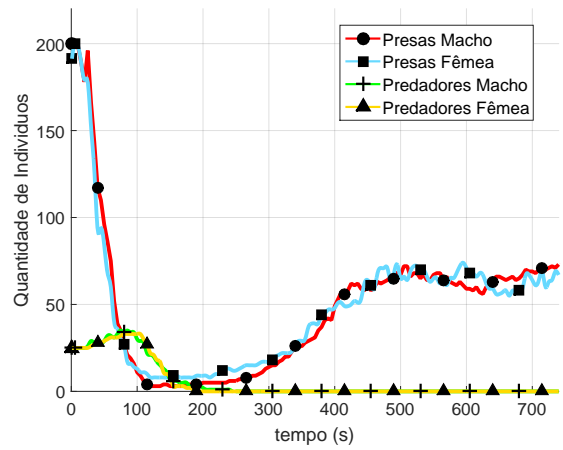
(a)



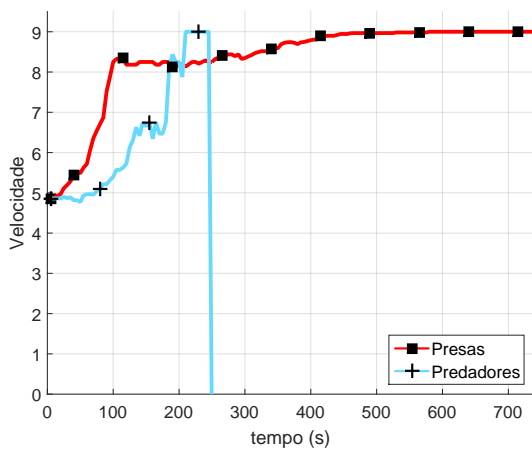
(b)



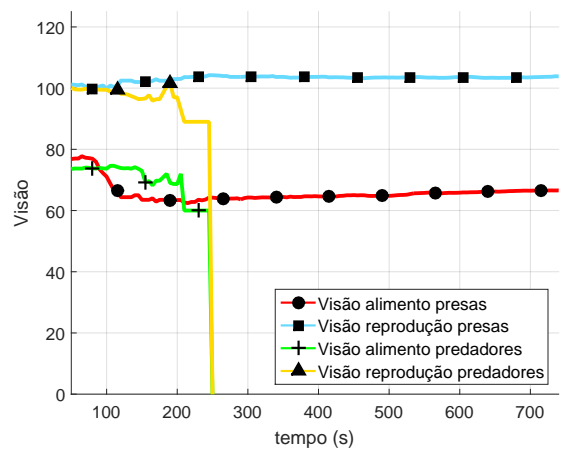
(c)



(d)

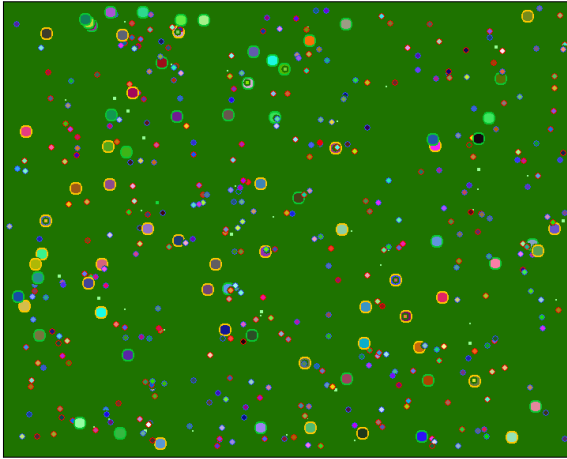


(e)

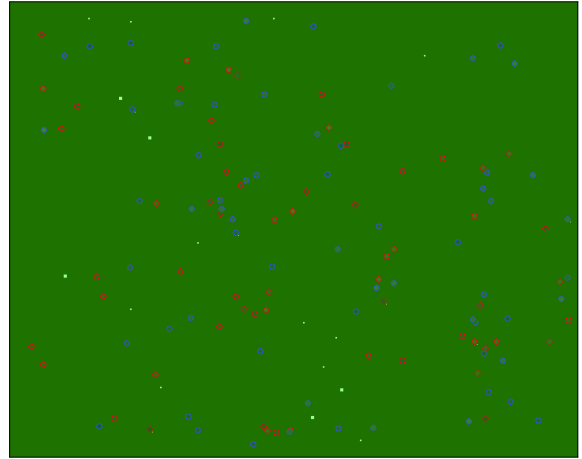


(f)

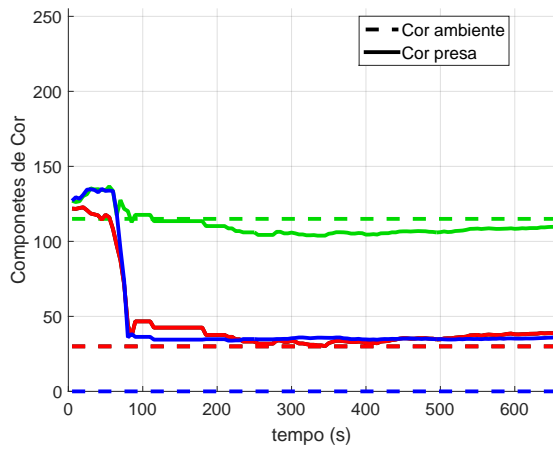
D.4.6 Resultados do experimento IV.6.



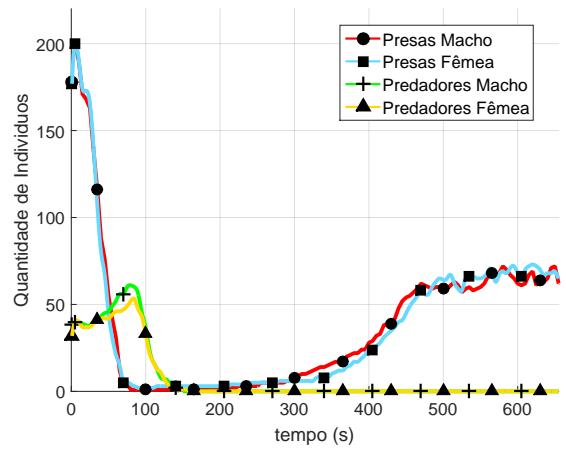
(a)



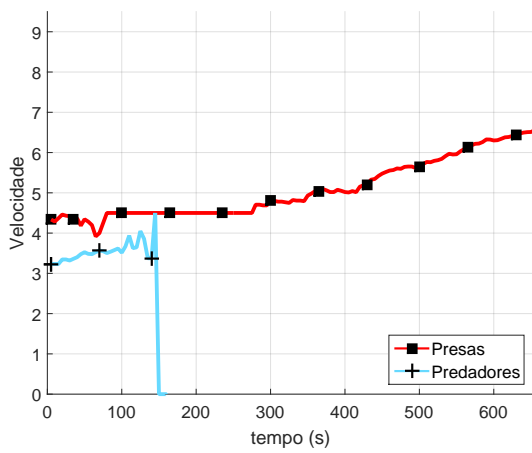
(b)



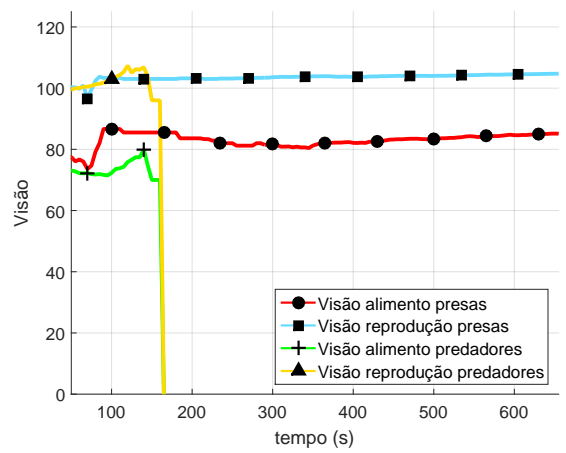
(c)



(d)

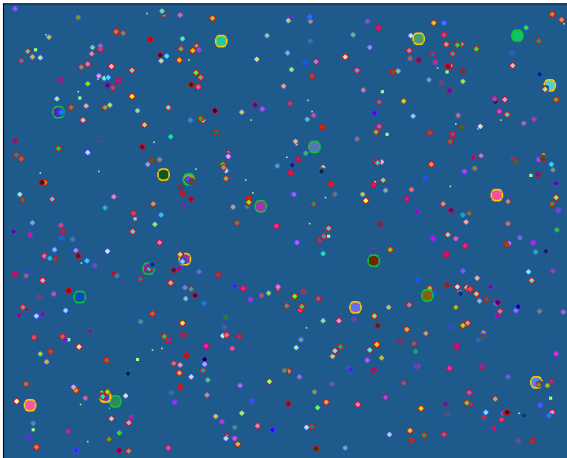


(e)

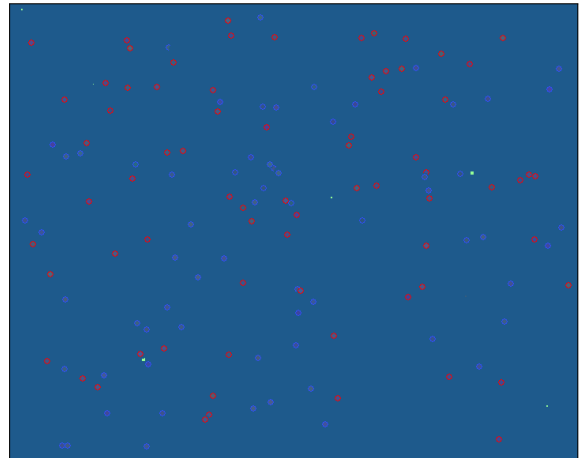


(f)

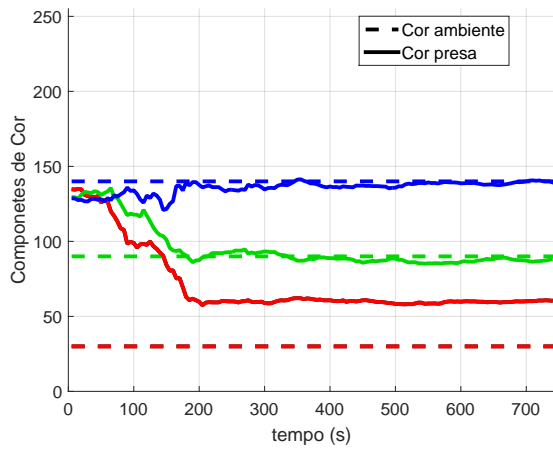
D.4.7 Resultados do experimento IV.8.



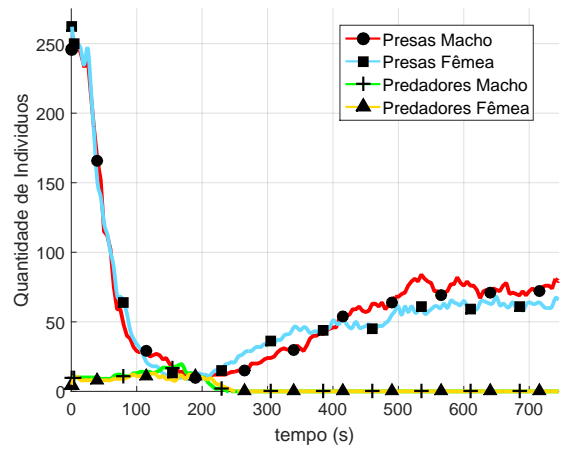
(a)



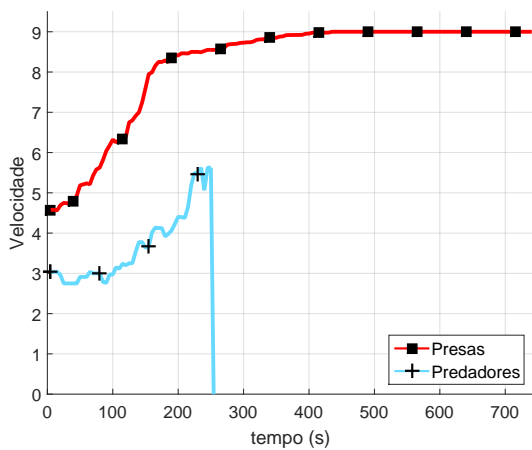
(b)



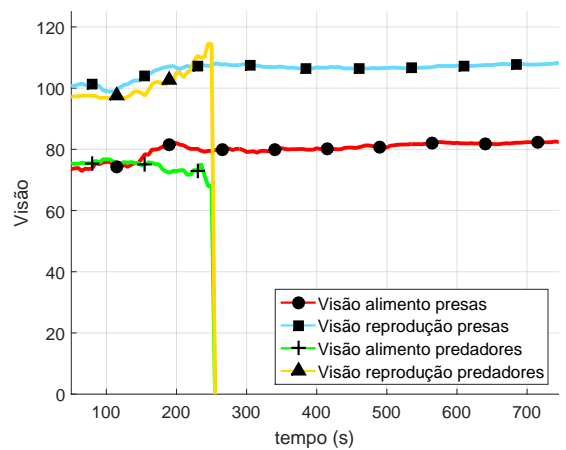
(c)



(d)



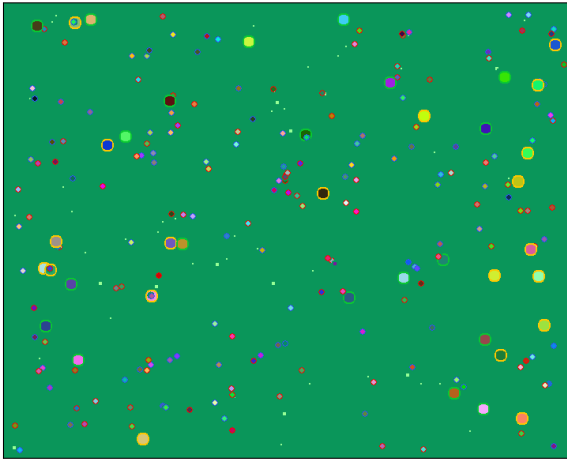
(e)



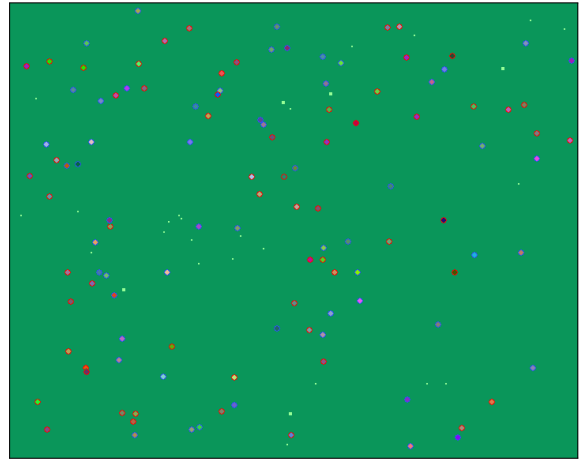
(f)

D.5 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO V

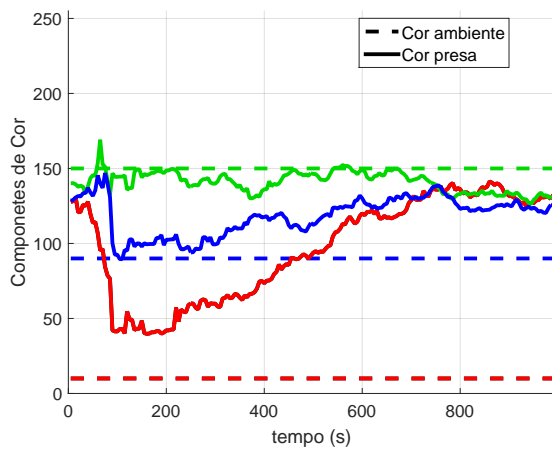
D.5.1 Resultados do experimento V.1.



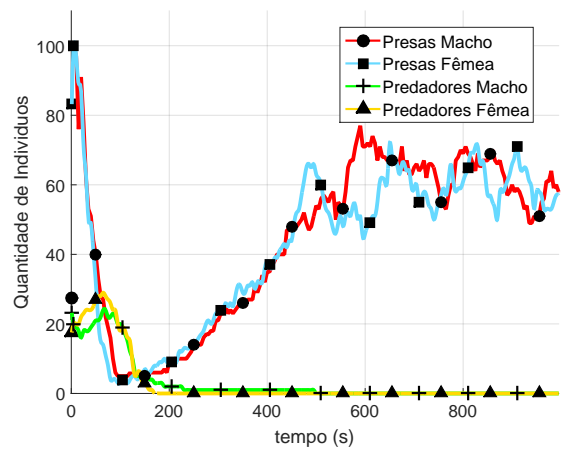
(a)



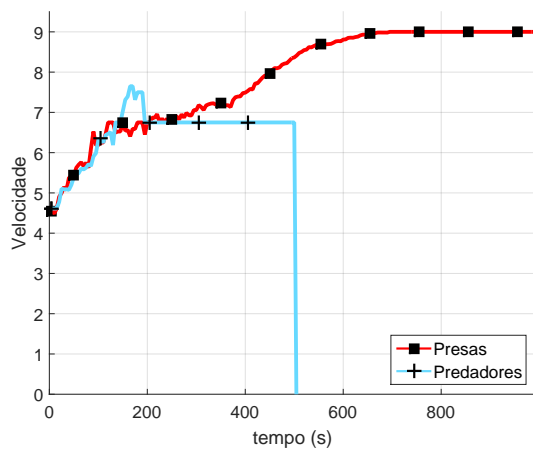
(b)



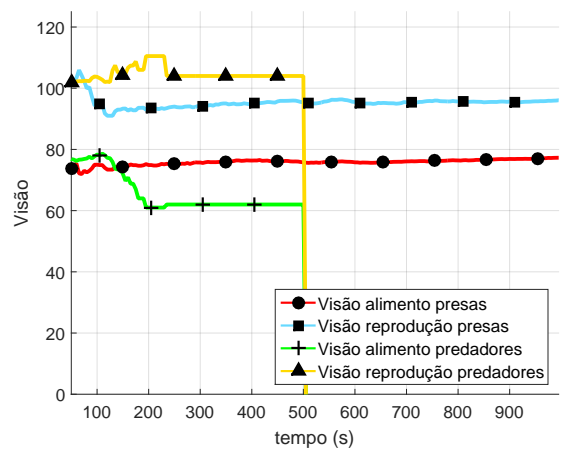
(c)



(d)

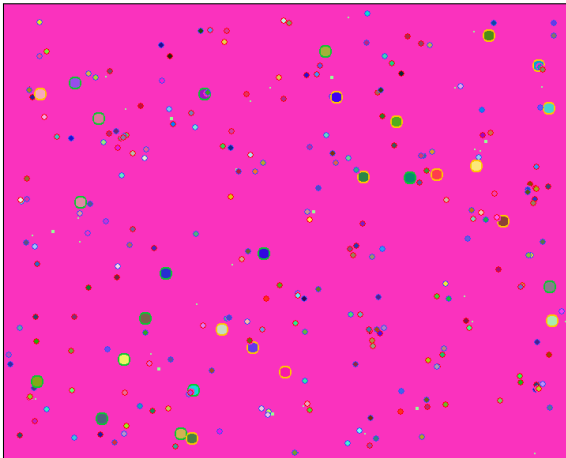


(e)



(f)

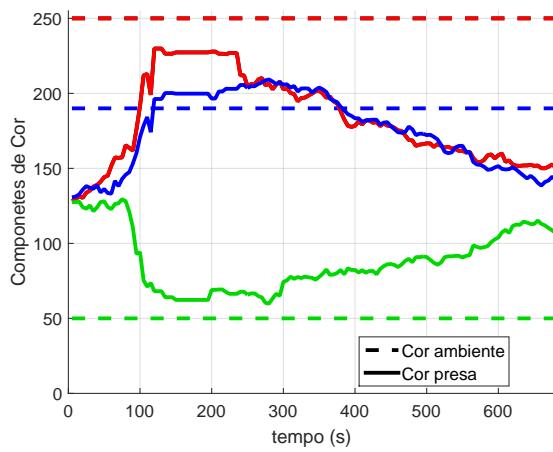
D.5.2 Resultados do experimento V.2.



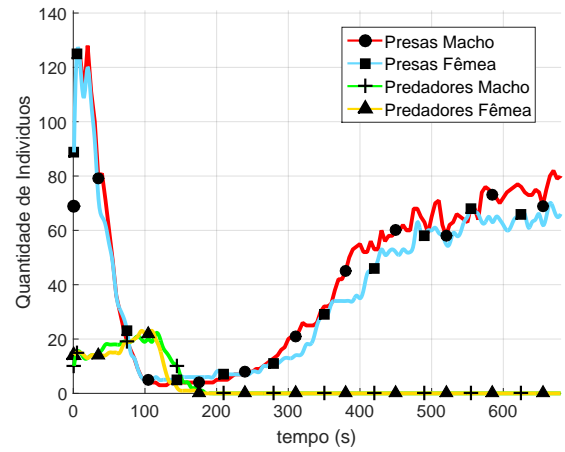
(a)



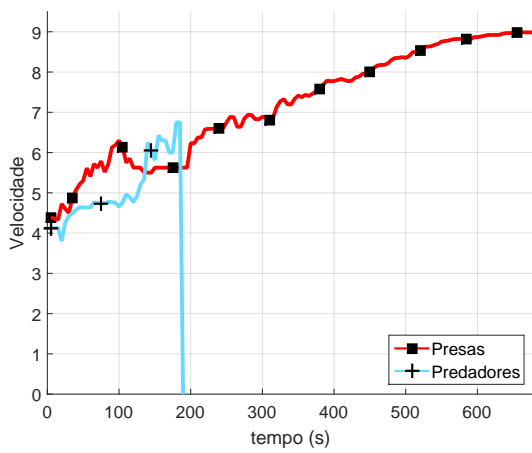
(b)



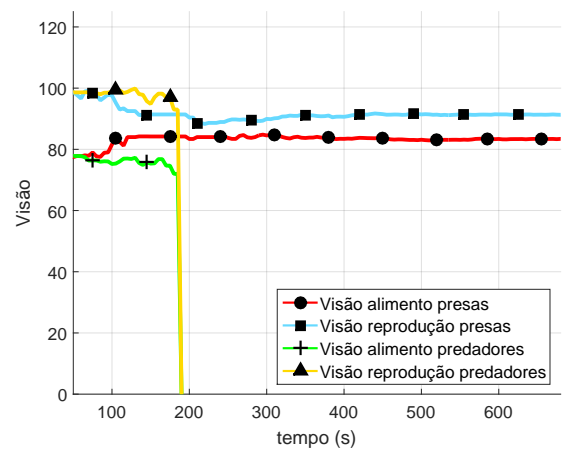
(c)



(d)

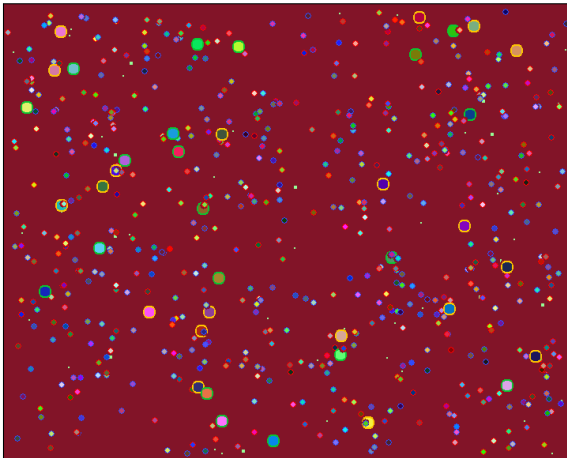


(e)

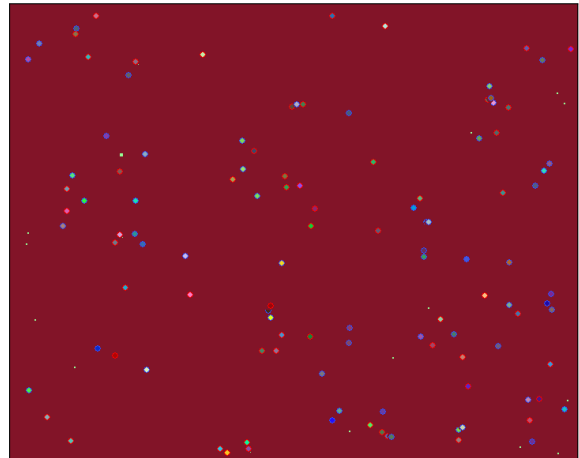


(f)

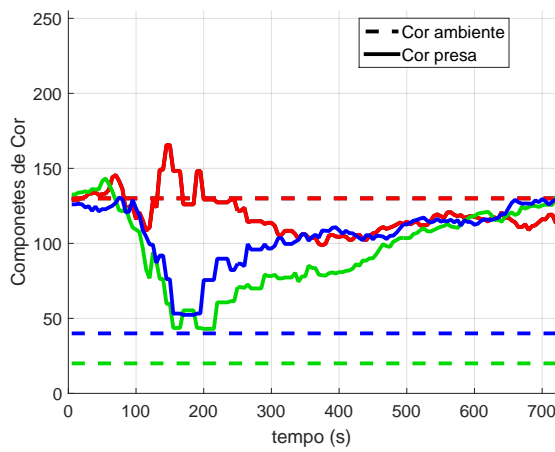
D.5.3 Resultados do experimento V.4.



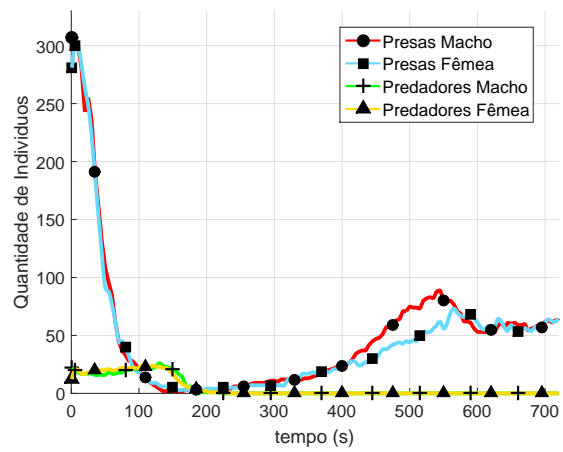
(a)



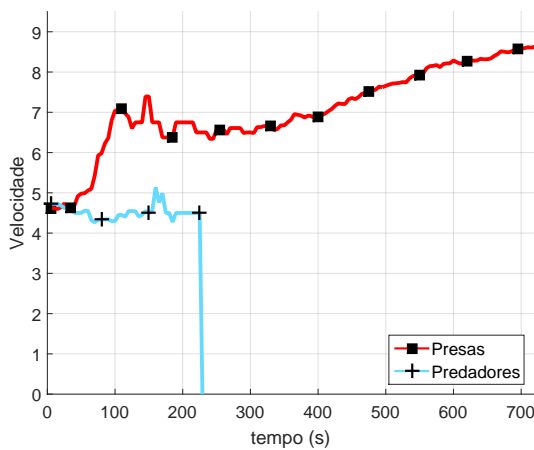
(b)



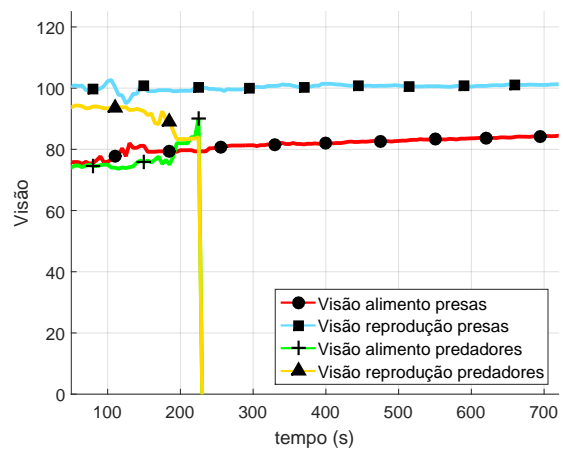
(c)



(d)

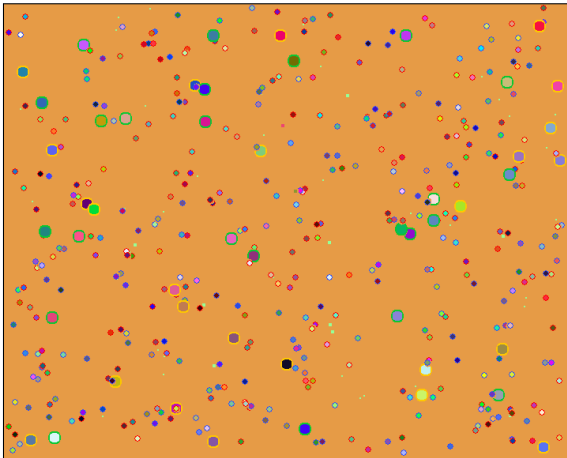


(e)

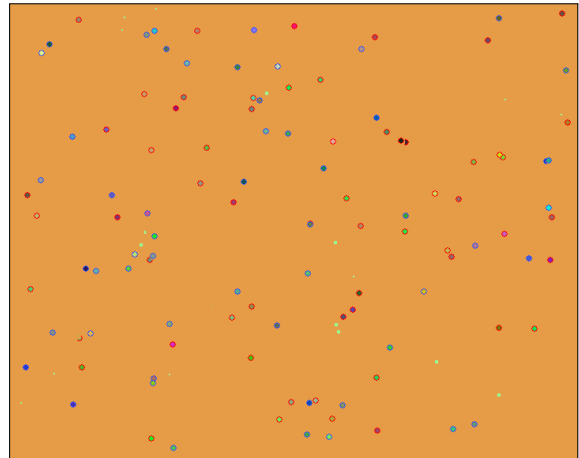


(f)

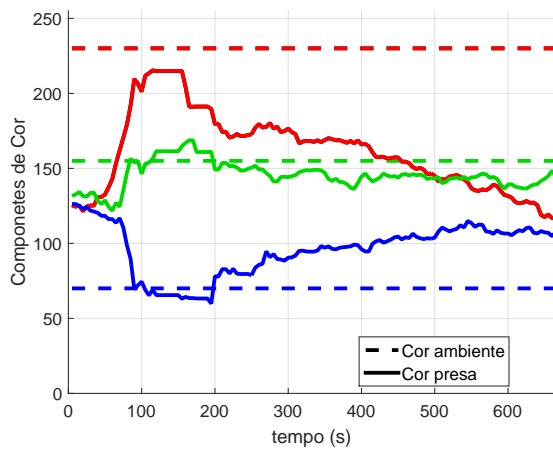
D.5.4 Resultados do experimento V.5.



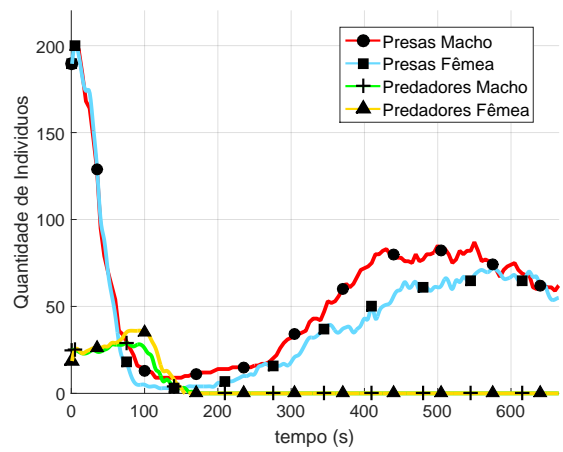
(a)



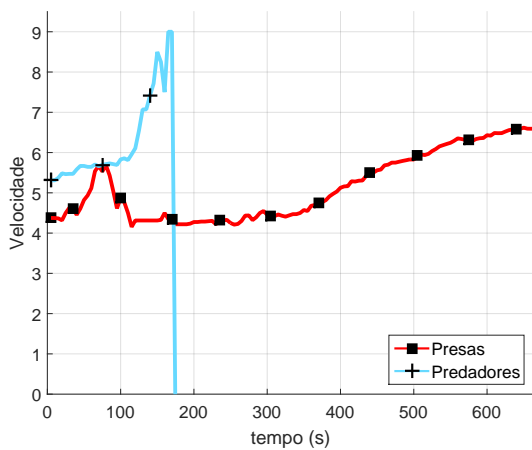
(b)



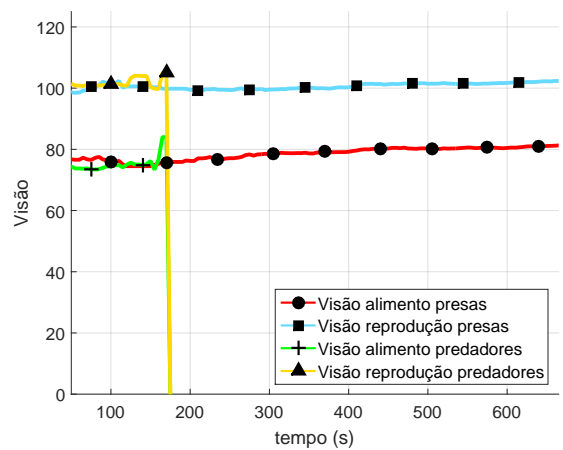
(c)



(d)

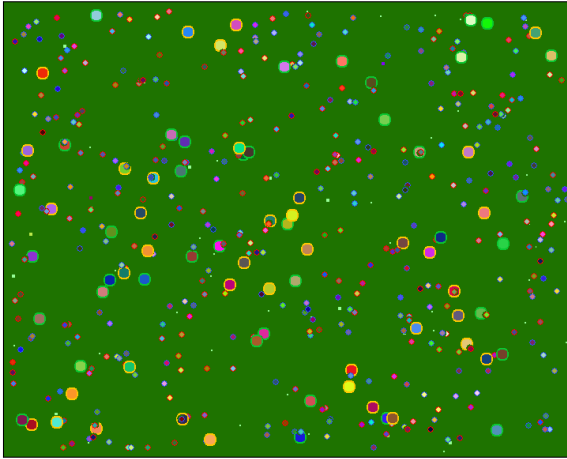


(e)

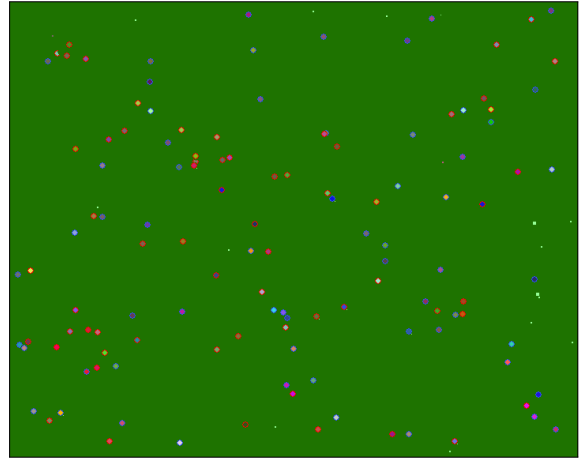


(f)

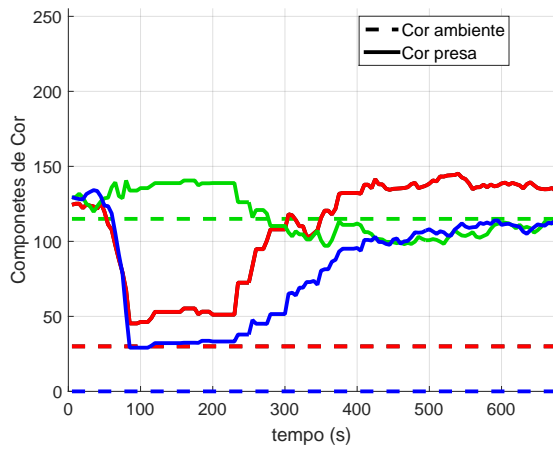
D.5.5 Resultados do experimento V.6.



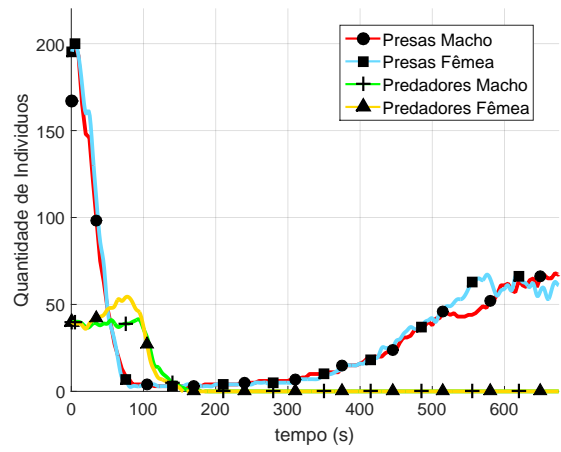
(a)



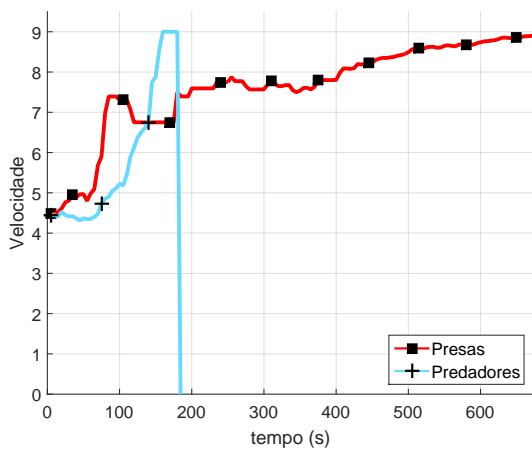
(b)



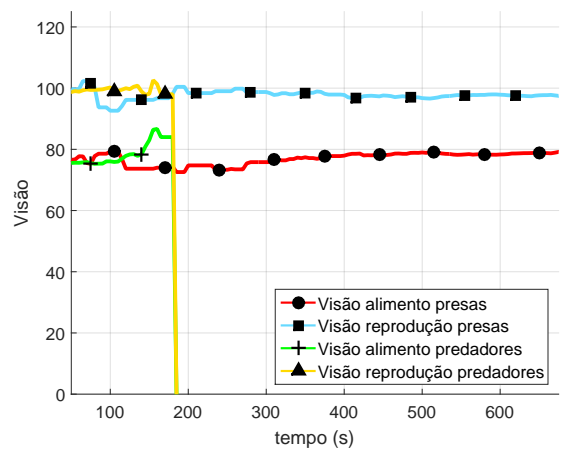
(c)



(d)

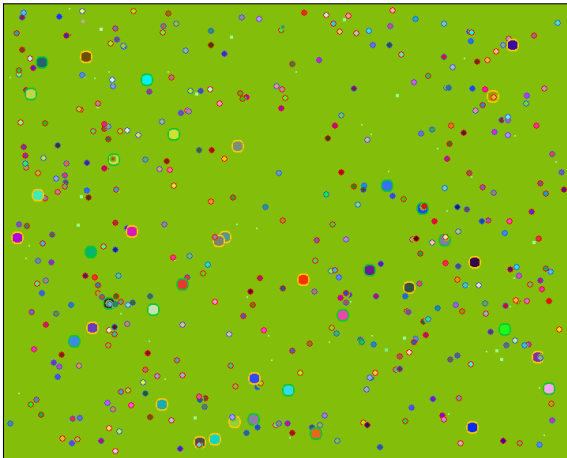


(e)

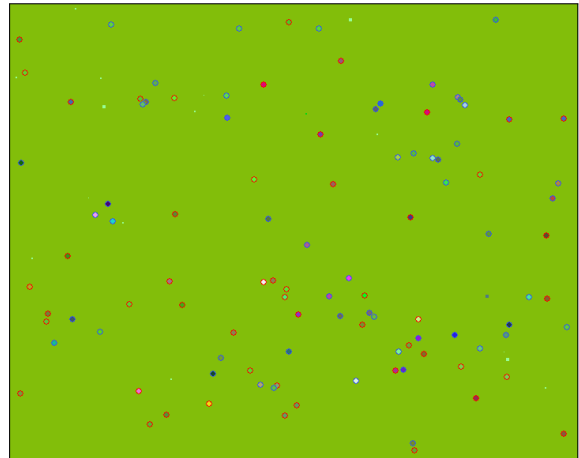


(f)

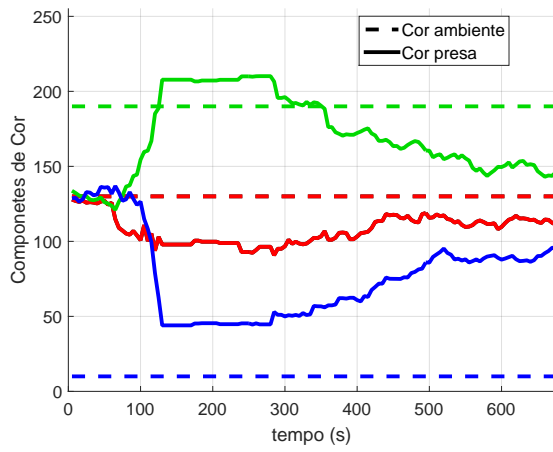
D.5.6 Resultados do experimento V.7.



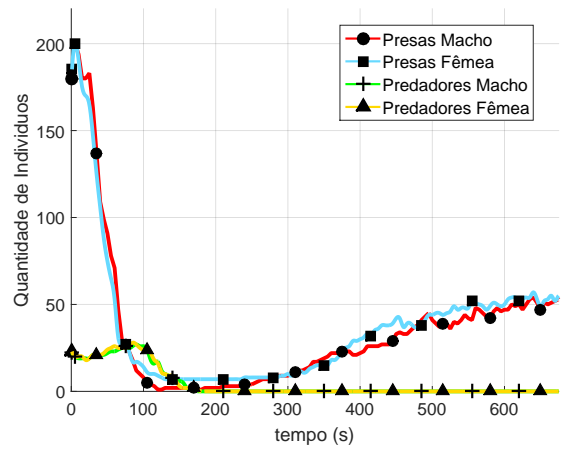
(a)



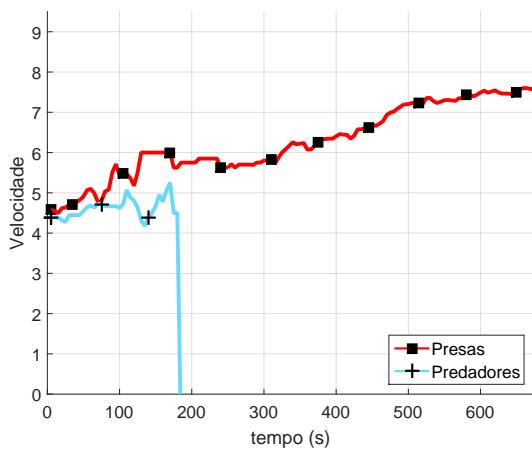
(b)



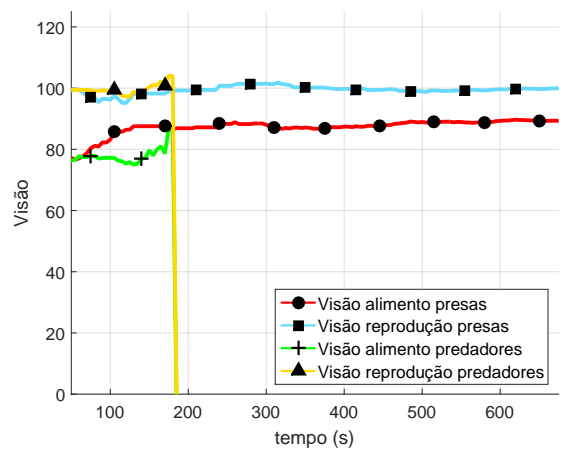
(c)



(d)

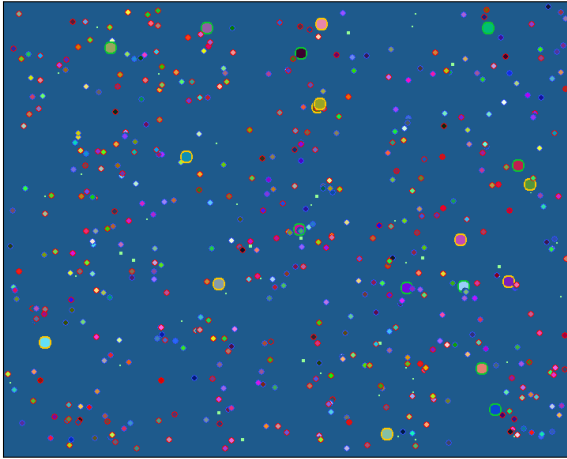


(e)

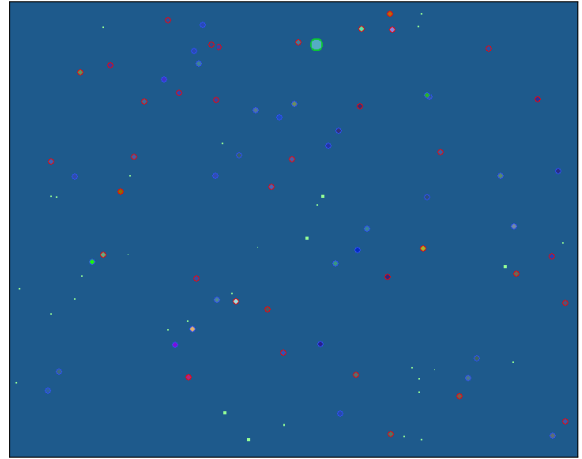


(f)

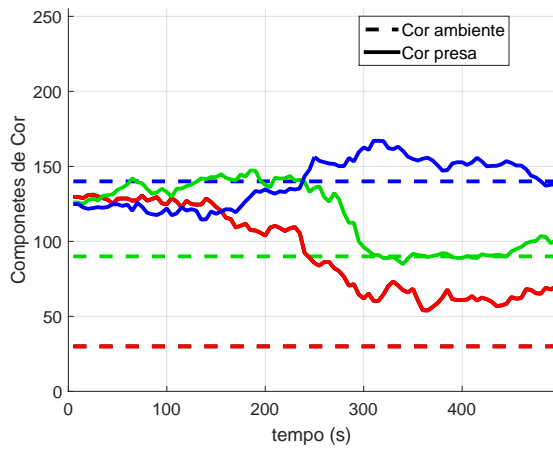
D.5.7 Resultados do experimento V.8.



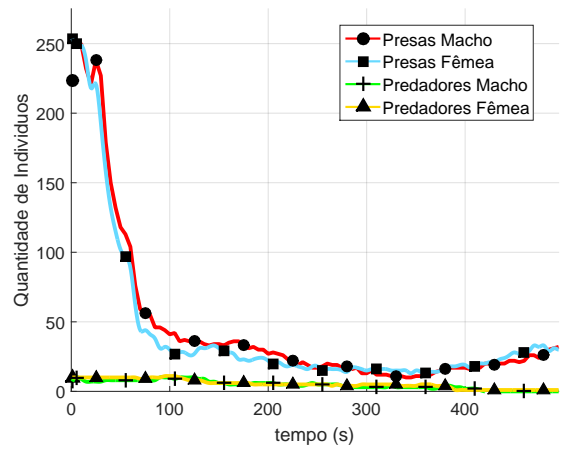
(a)



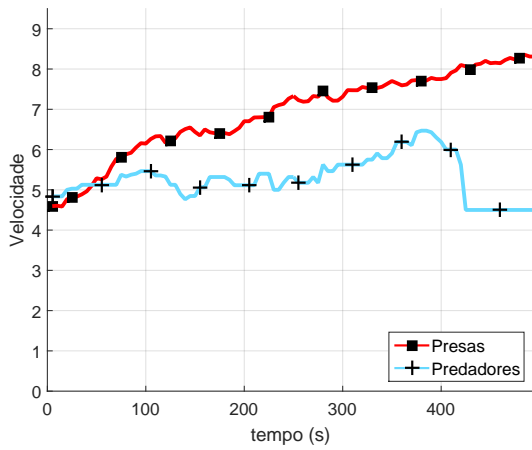
(b)



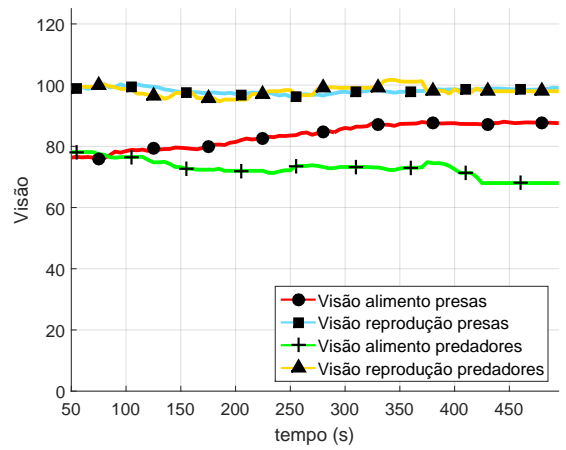
(c)



(d)



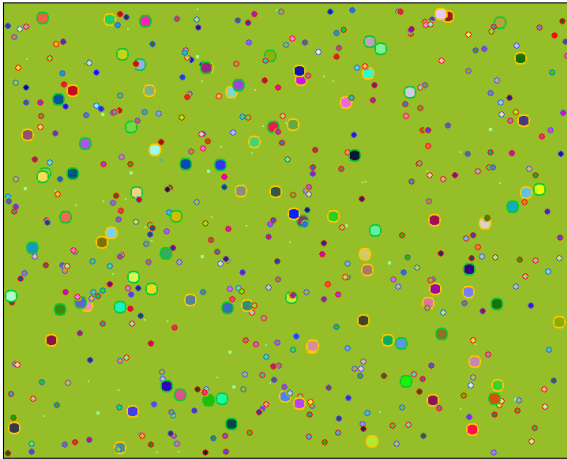
(e)



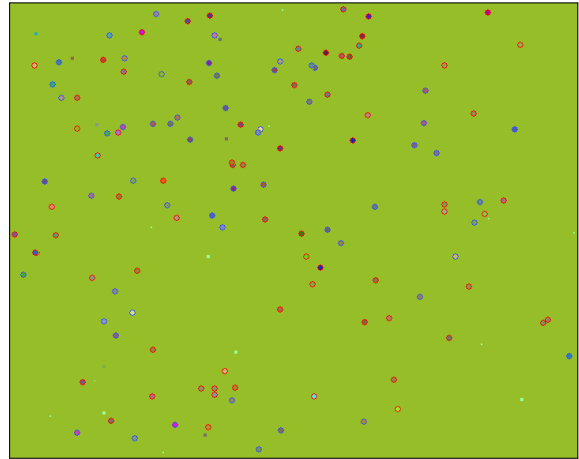
(f)

D.6 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO VI

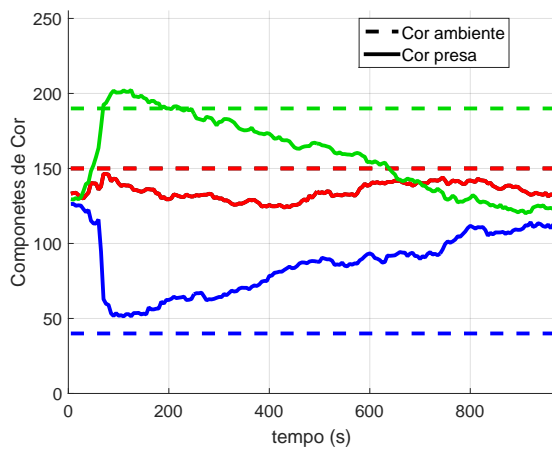
D.6.1 Resultados do experimento VI.2.



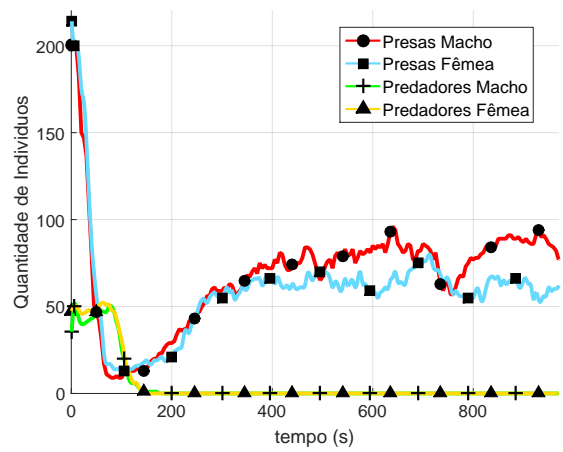
(a)



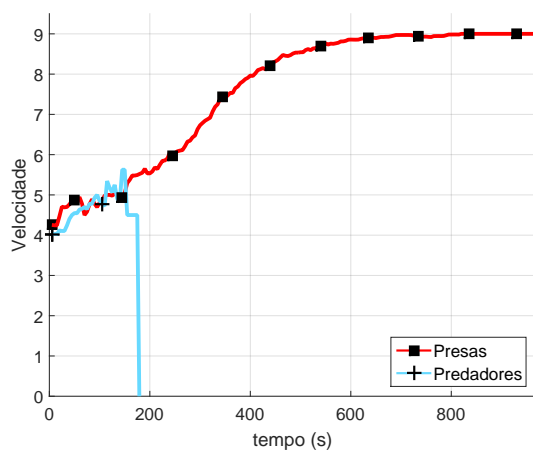
(b)



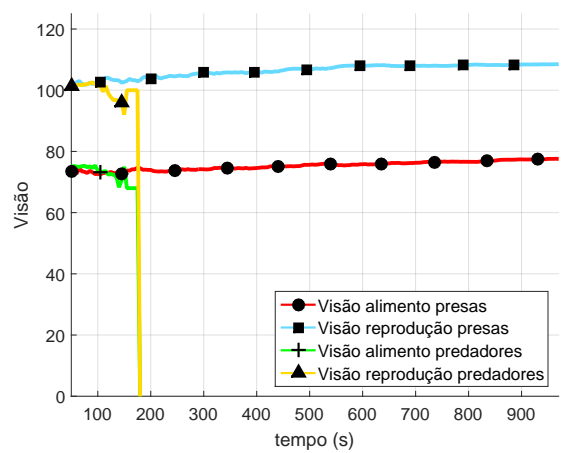
(c)



(d)

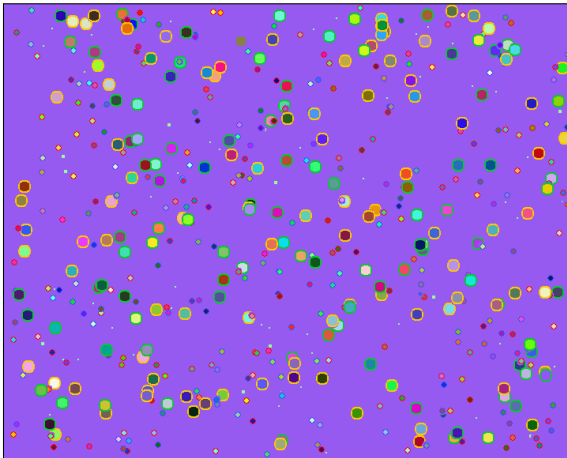


(e)

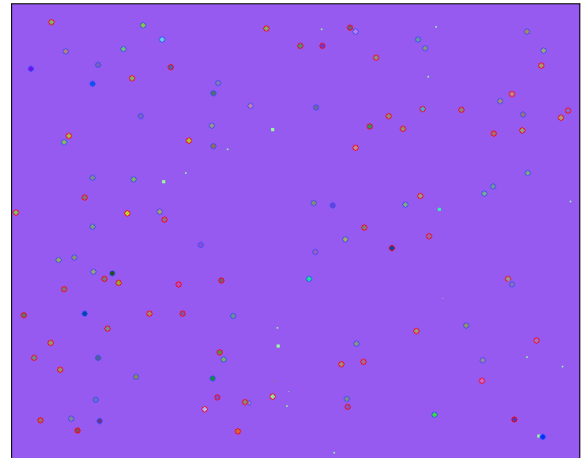


(f)

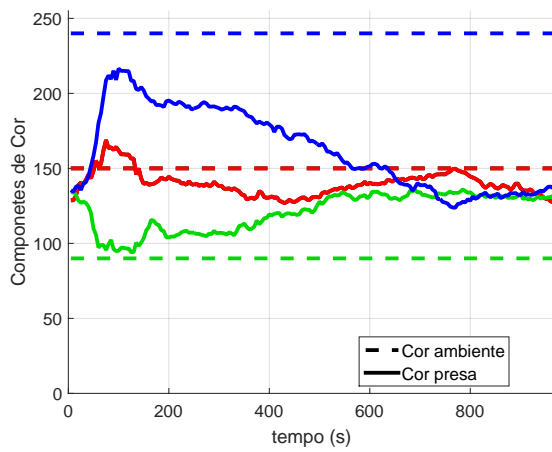
D.6.2 Resultados do experimento VI.3.



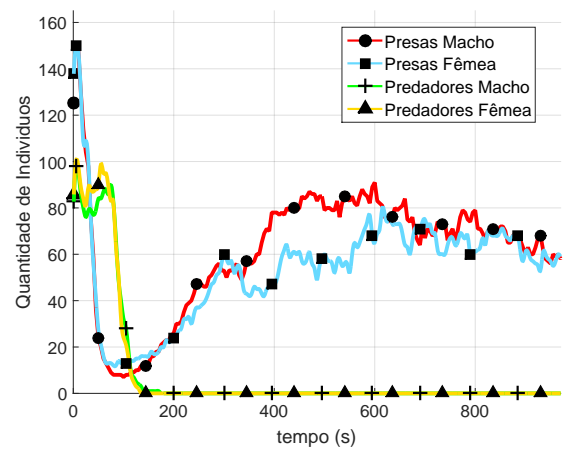
(a)



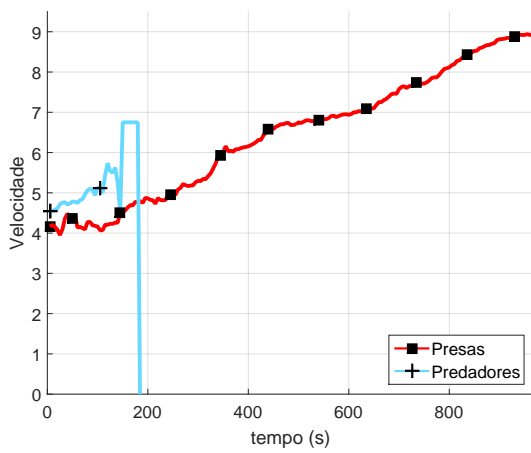
(b)



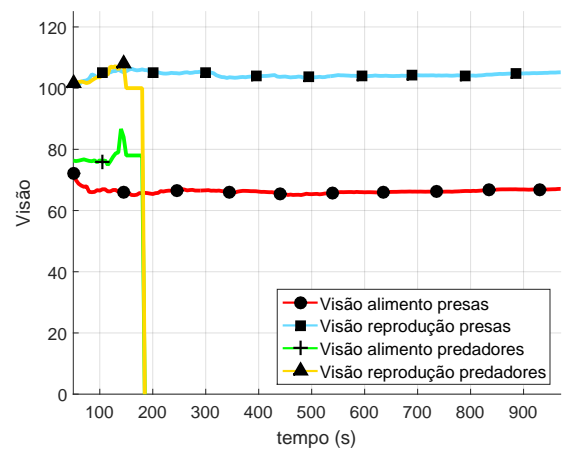
(c)



(d)

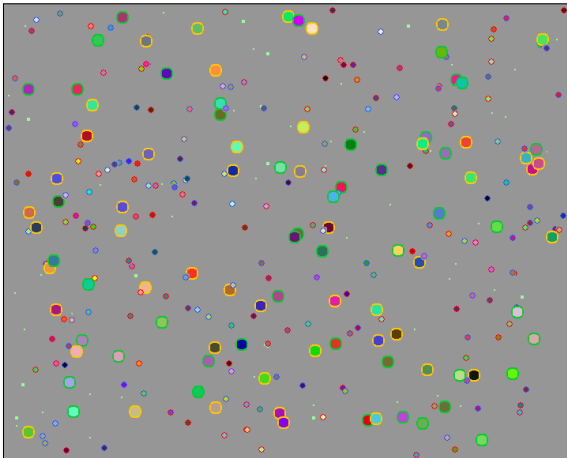


(e)

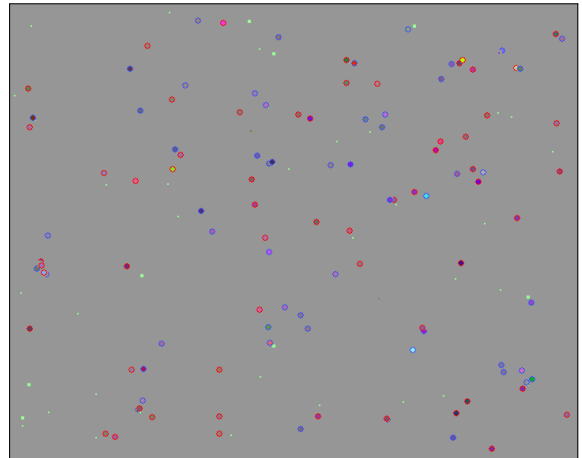


(f)

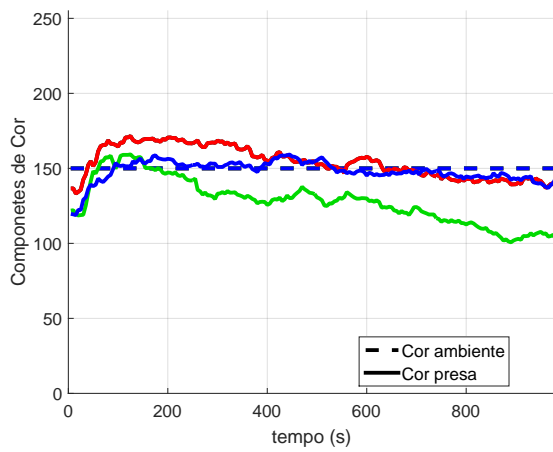
D.6.3 Resultados do experimento VI.4.



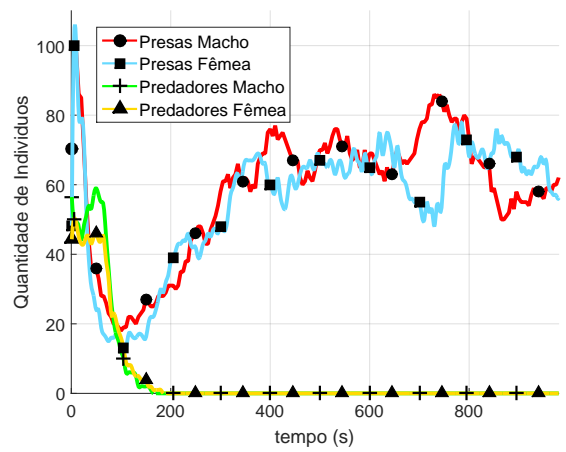
(a)



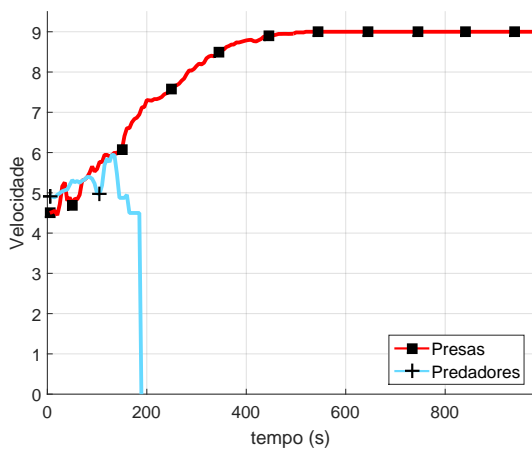
(b)



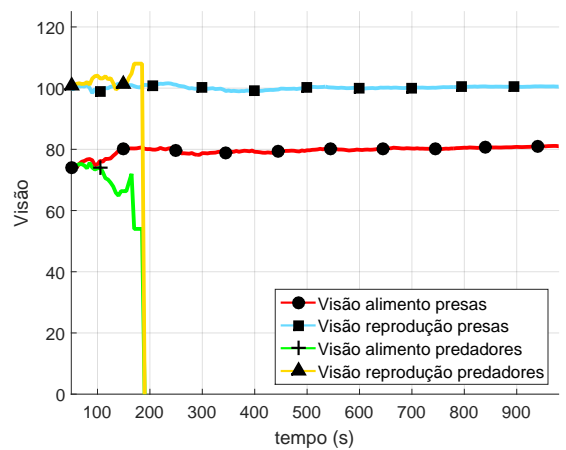
(c)



(d)



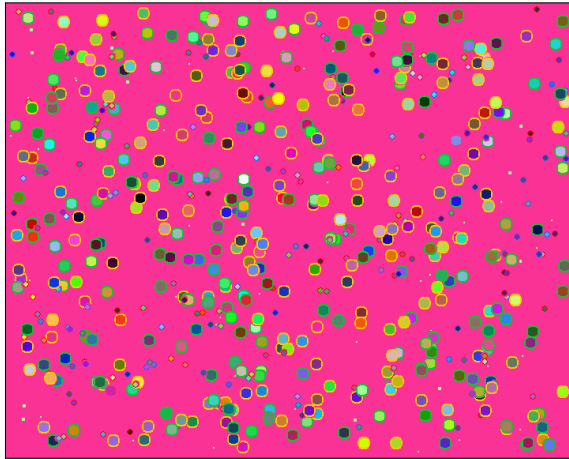
(e)



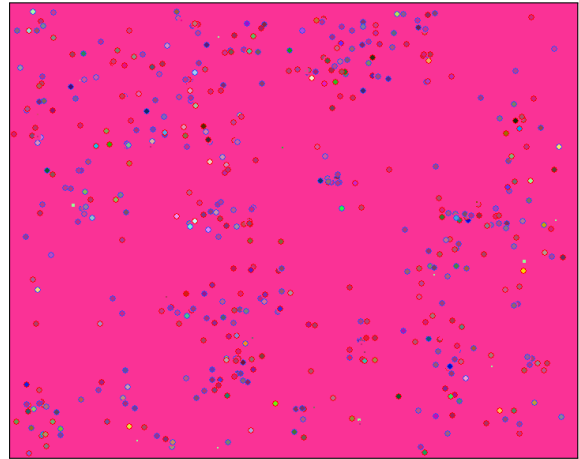
(f)

D.7 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO VII

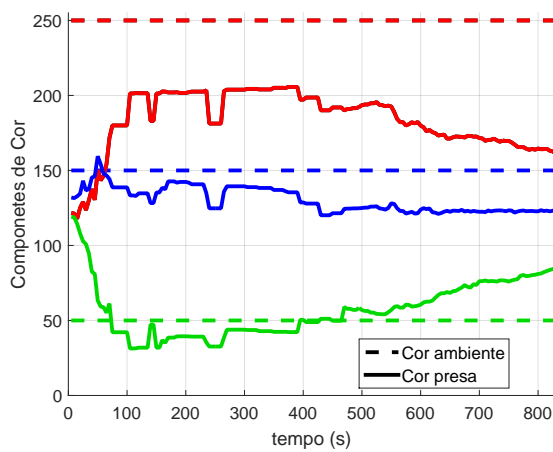
D.7.1 Resultados do experimento VII.1.



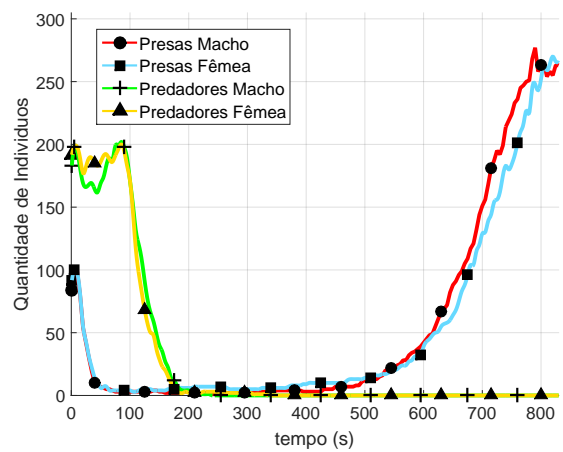
(a)



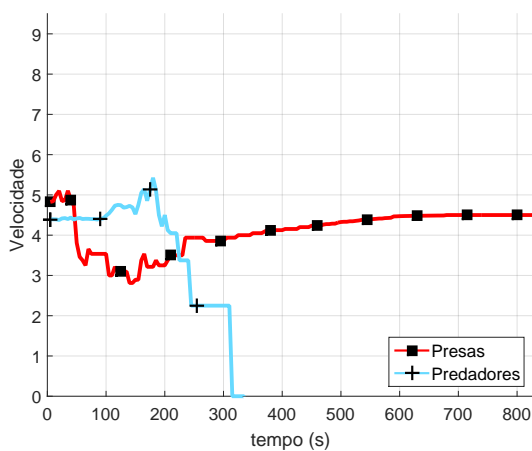
(b)



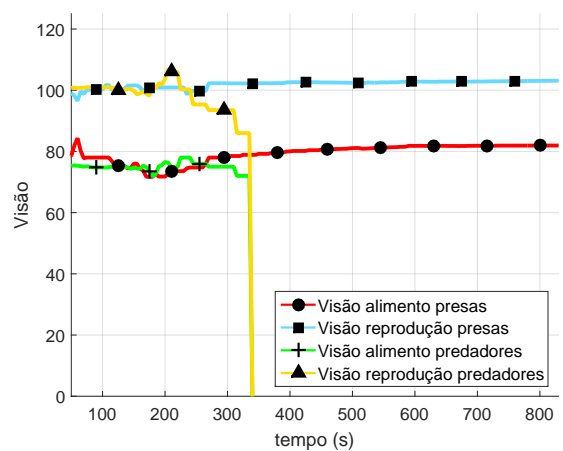
(c)



(d)

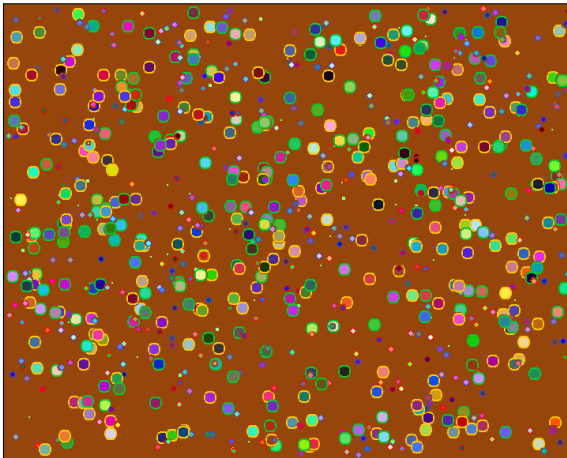


(e)

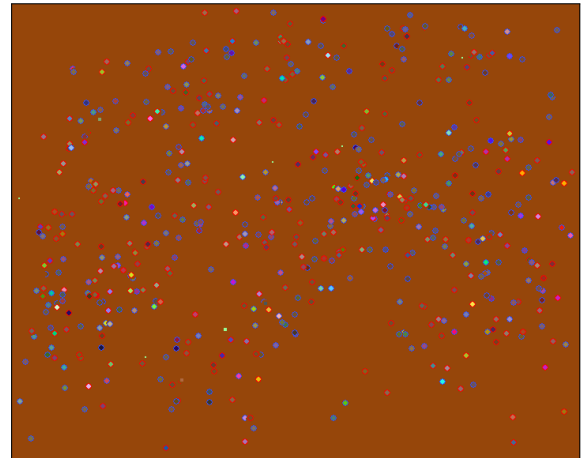


(f)

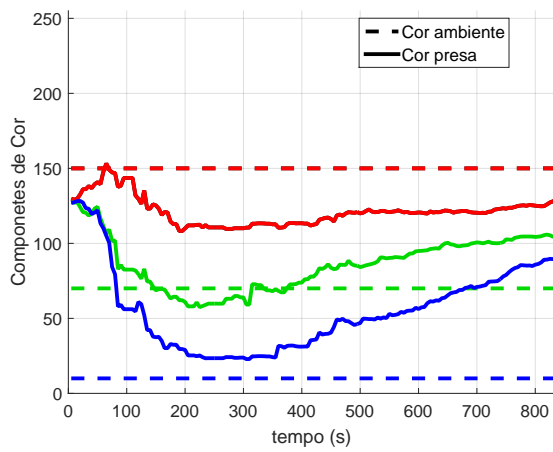
D.7.2 Resultados do experimento VII.2.



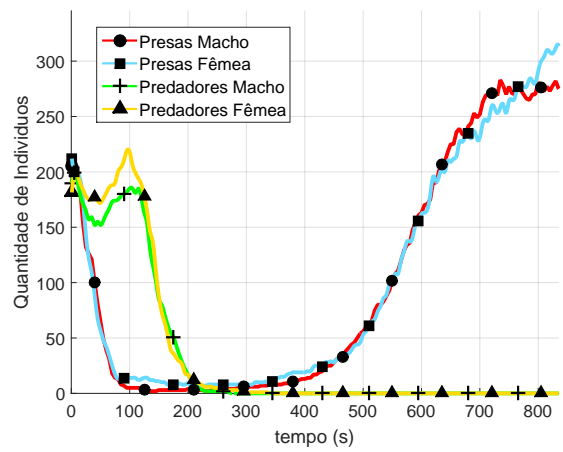
(a)



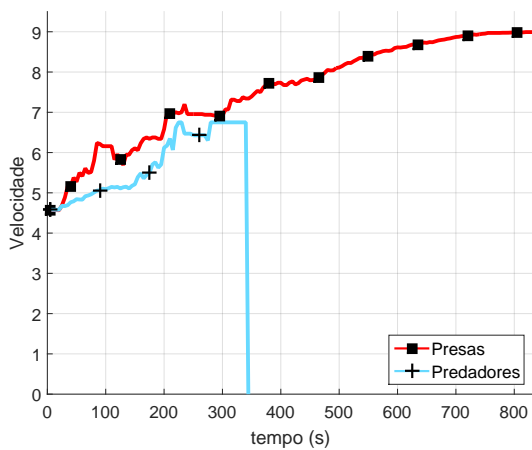
(b)



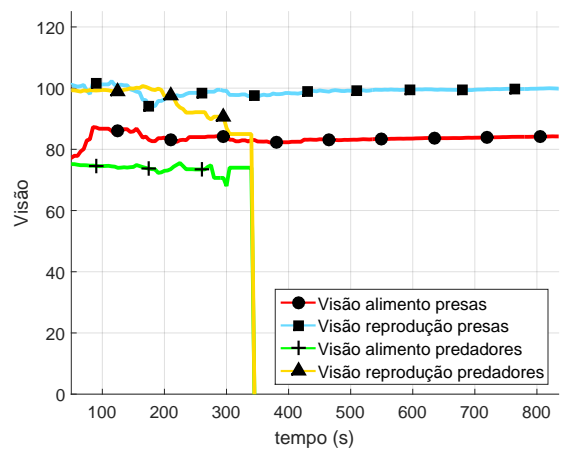
(c)



(d)

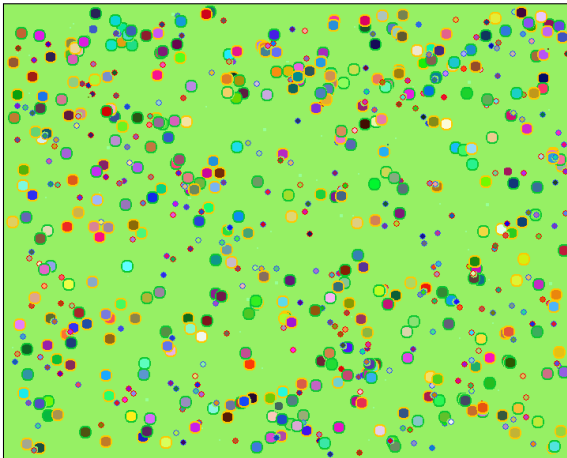


(e)

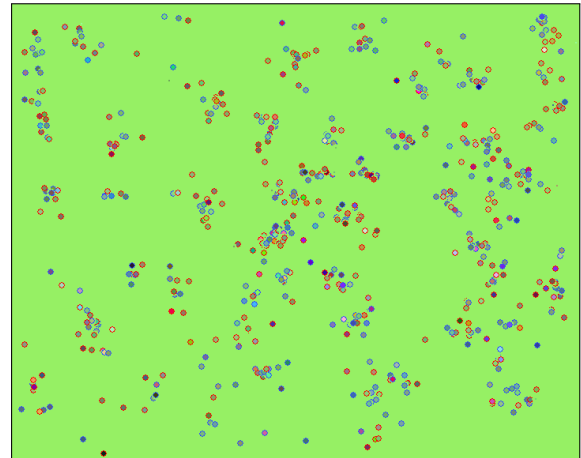


(f)

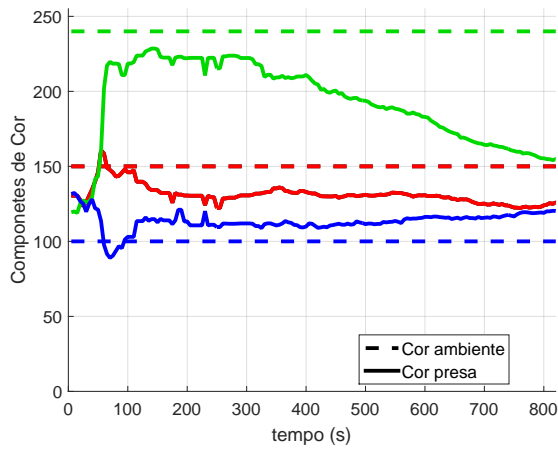
D.7.3 Resultados do experimento VII.4.



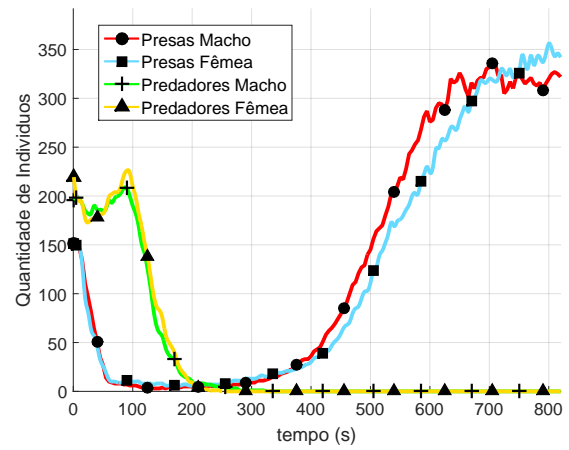
(a)



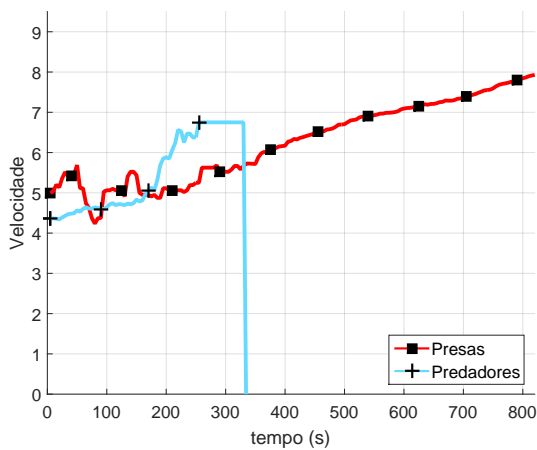
(b)



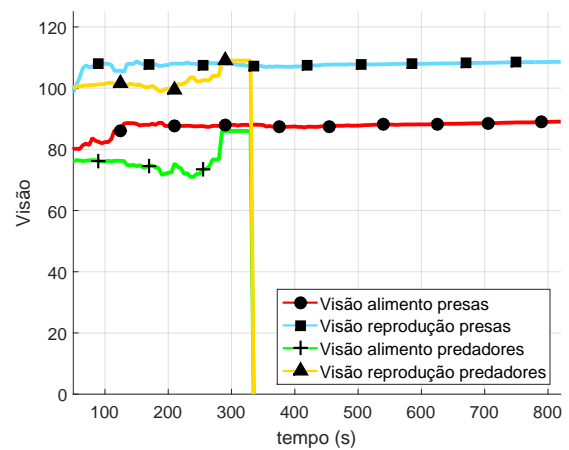
(c)



(d)



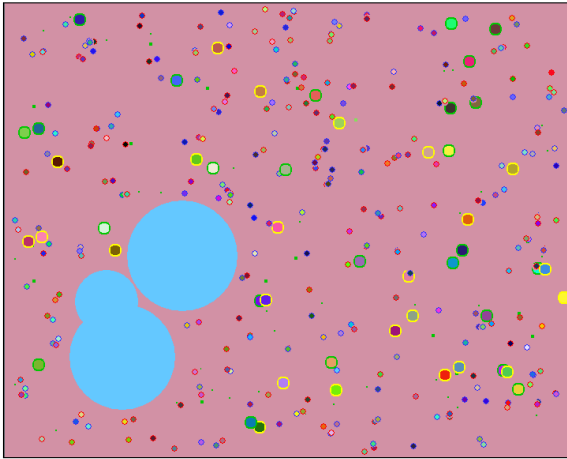
(e)



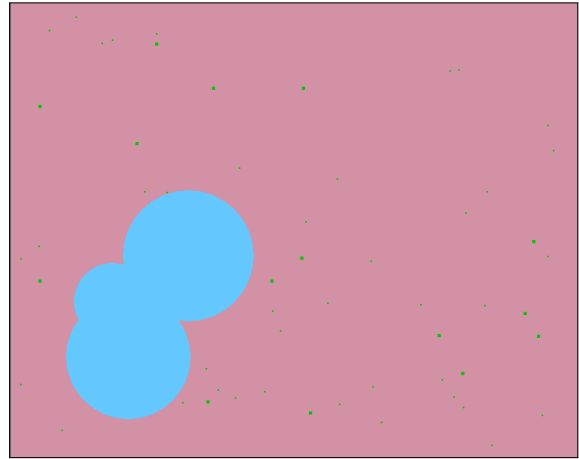
(f)

D.8 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO VIII

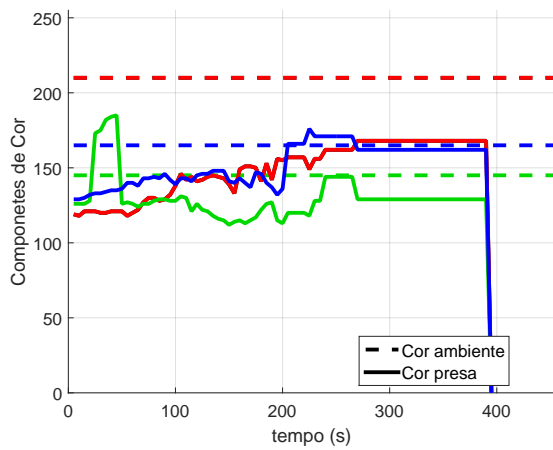
D.8.1 Resultados do experimento VIII.2.



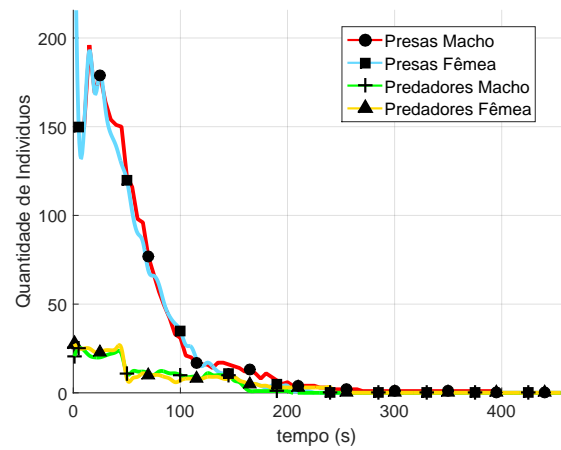
(a)



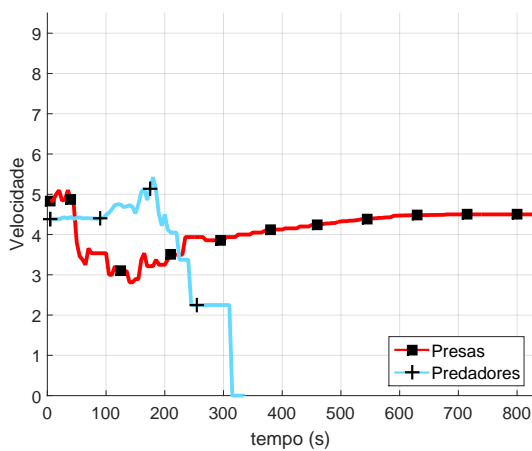
(b)



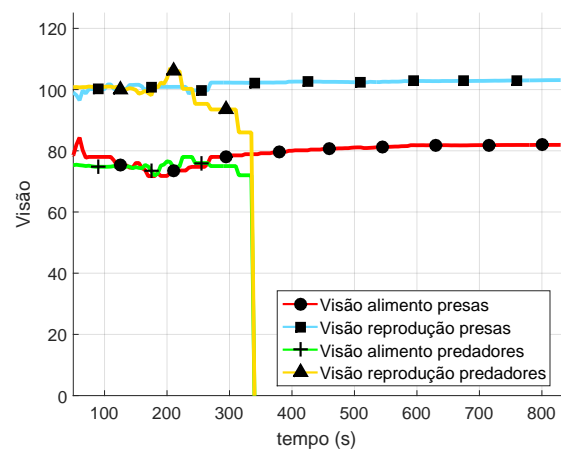
(c)



(d)

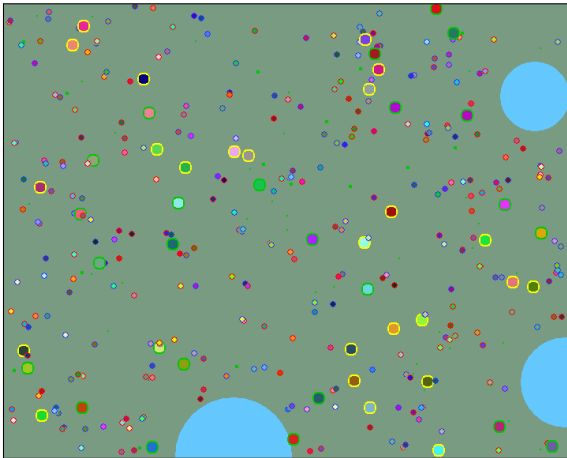


(e)

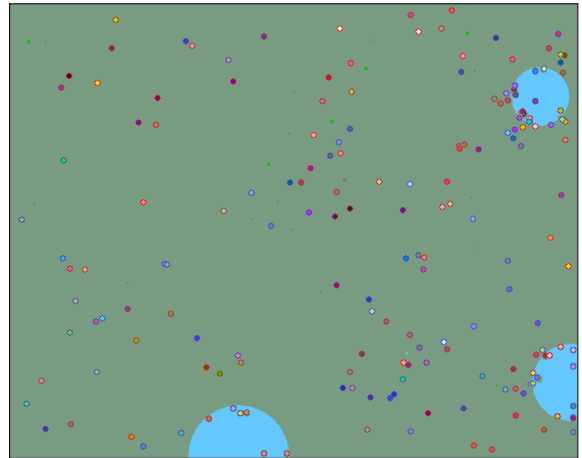


(f)

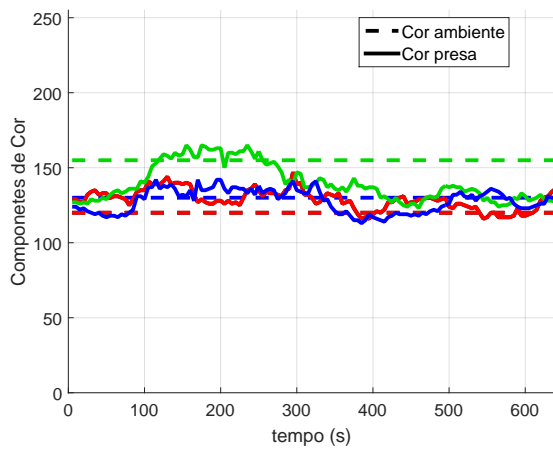
D.8.2 Resultados do experimento VIII.3.



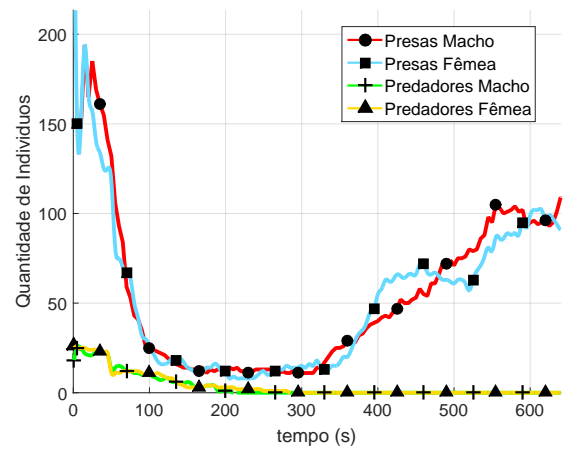
(a)



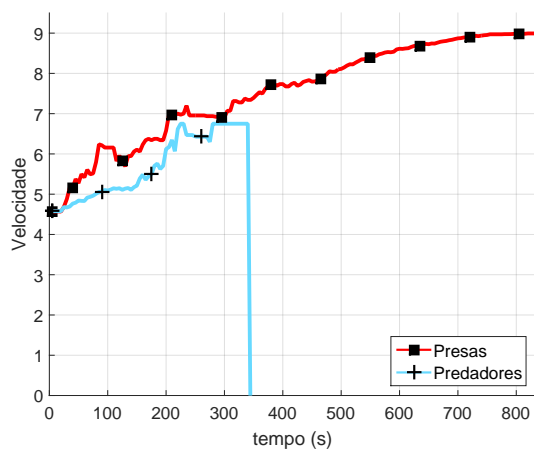
(b)



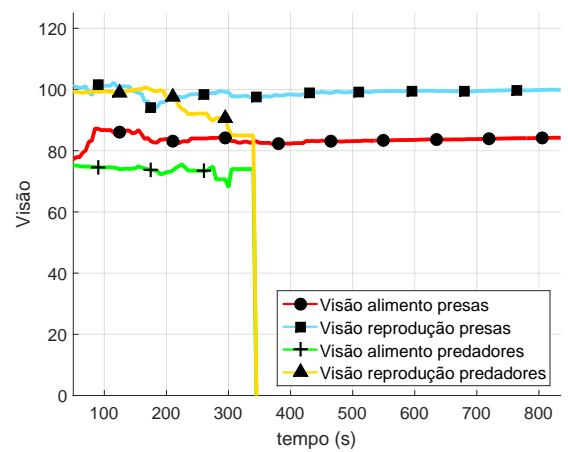
(c)



(d)

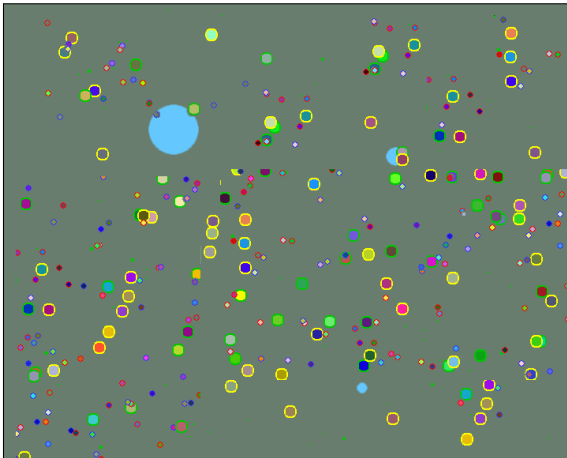


(e)

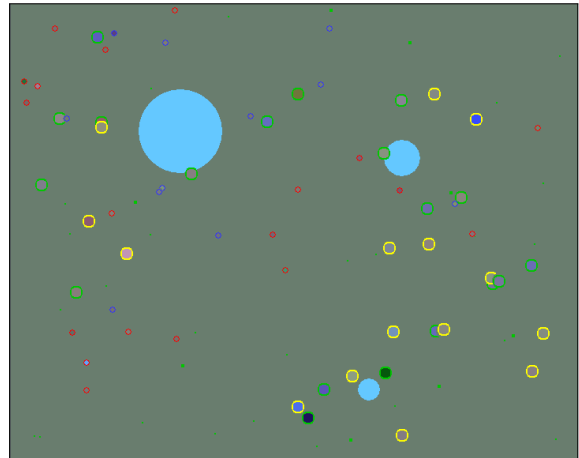


(f)

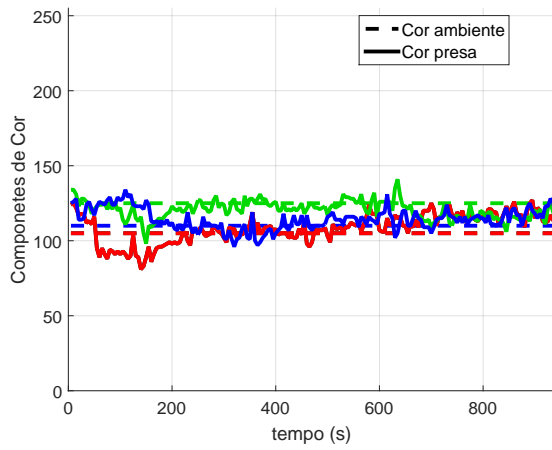
D.8.3 Resultados do experimento VIII.4.



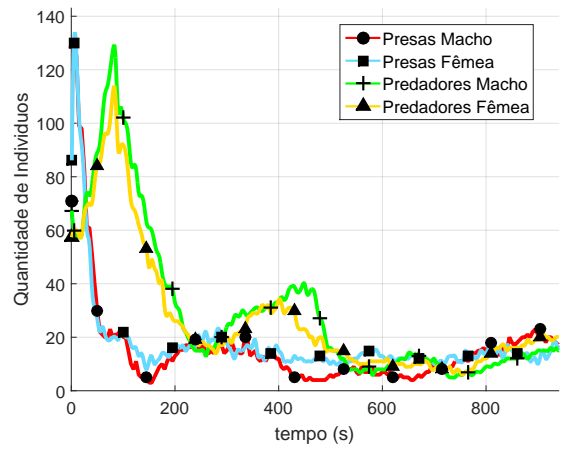
(a)



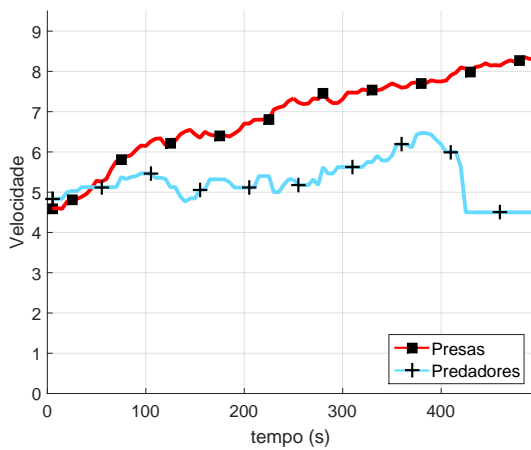
(b)



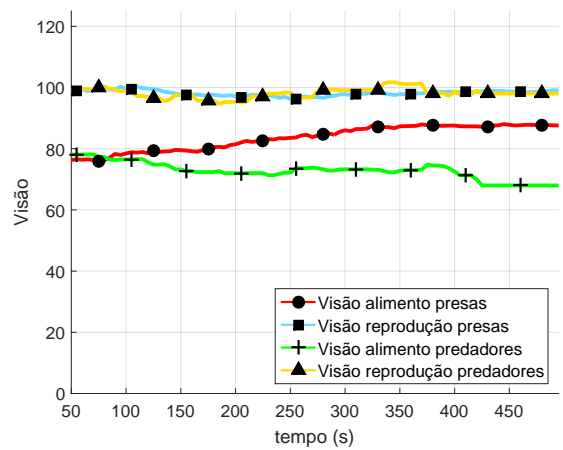
(c)



(d)



(e)



(f)