

# Swarm Robotics: comportamento Adaptativo Aplicado ao problema de dispersão de pássaros em áreas agrícolas

A. P. Silva, R. I. S. Filho and F. A. Rodrigues

**Resumo**— *Swarm Robotics é o estudo dos comportamentos coletivos complexos que emergem das inúmeras interações entre dois ou mais robôs integrantes do exame. O objetivo principal desse trabalho é a formulação de um método que empregue um grupo de robôs móveis para monitoramento de uma área agrícola. Quando violado o acesso desse local por pássaros, os robôs executam procedimentos para dispersá-los da região. Para atingir essa meta são utilizados os principais conceitos e propriedades referentes a Swarm Robotic. Acredita-se que no futuro o emprego dessa proposta na agricultura poderá minimizar os danos provocados pelos pássaros à vegetação cultivada.*

**Keywords**— *Swarm Robotics, Adaptatividade, Auto-organização, Agricultura.*

## I. INTRODUÇÃO

O prejuízo provocado por pássaros para a produção hortícola na Austrália é estimado em quase US\$ 300 milhões por ano. Nesse país existem aproximadamente 60 espécies de pássaros que são conhecidas por danificar culturas agrícola. Essas espécies possuem diferenças marcantes em estratégias de alimentação e padrões de movimentos que influenciam a natureza, a época e a gravidade dos danos que causam. [4]

O crescente desmatamento provocado pelo ser humano, em busca de moradia ou para expansão agrícola tem causado impactos nos *habitats* dos pássaros, resultando na migração de algumas espécies para regiões diferentes em busca de alimentos (brotos, frutos e sementes) e abrigo. Essa situação acarreta uma interação mais frequente dos pássaros com as áreas de cultivo. [5] [6]

Entre as espécies que causam prejuízo na agricultura podemos citar alguns exemplos:

- No Brasil, o Anu, da espécie (*Agelaius ruficapillus*), traz danos à cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. Ele arranca as plântulas na fase inicial da cultura, o que pode reduzir aproximadamente em 25 a 60 por cento a população de plantas. Lavouras de arroz pré-germinado são as preferidas dessa espécie de pássaro, principalmente as mais próximas dos bosques. Eles também atacam durante a fase de maturação dos grãos, podendo causar perdas de produtividade superiores a 1250 kg por hectare [7].

- Os pássaros da família *Scrup* (*Aphelocoma coerulescens*) são encontrados no oeste dos Estados Unidos, partes do

México, e na região central da Flórida. Eles se alimentam de nozes, figos, uvas, grãos, ervilhas, milho, bagas, cerejas, ameixas e peras, podendo trazer sérias depredações a essas culturas; [8]

- As aves *Magpies* da família *Corvidae* são encontradas em todo o hemisfério norte e podem causar danos substanciais para culturas de amêndoas, milho, nozes, melão, uvas, pêssegos, trigo e figos. [9]

Várias são as formas utilizadas pelos agricultores para minimizar os prejuízos decorrentes da presença de pássaros nas lavouras. Tais formas incluem desde a permissão do abate, obtida junto às autoridades responsáveis, bem como o emprego de diversas técnicas para dispersá-los, entre elas: por meio do som [8][9], pelo emprego da luz [9][12][13], por meio de predadores [14], por meio de modificação do *habitat* [1][8], pelo emprego do sistema de exclusão da compensação [4], pelo emprego de repelentes químicos [8] [10], pelo uso de avicidas [8] [10] e outras soluções[7].

Entretanto, verifica-se que a maioria dessas técnicas possui algum tipo de limitação, quer seja para sua implantação quer seja para sua manutenção. Dentro desse contexto, é necessário estudar novas técnicas para minimizar os danos provocados pela ação dos pássaros.

Entre os vários fatores que possibilitaram a ênfase na pesquisa e desenvolvimento de robôs pequenos e de baixo custo pode-se citar: o aumento do poder de computação dos microcontroladores, os avanços na miniaturização de sensores e os resultados positivos observados a partir das interações de times de robôs [16] em diversos contextos: em ambientes hostis (locais contaminados ou com temperaturas extremas), na monitoração de ambientes (localização de alvos, detecção de intrusões, focos de incêndio, etc.) e em operações de busca e salvamento.

Nesse contexto, cogitou-se a aplicação de times de robôs na dispersão de pássaros. Entretanto, o comportamento altamente dinâmico da ação dos pássaros pedia uma característica importante para a solução: a adaptatividade.

O objetivo principal desse trabalho é a avaliar se o uso de um grupo de robôs móveis para o monitoramento de uma área agrícola pode ser uma nova abordagem a ser empregada para dispersão de pássaros em áreas agrícolas.

A componente adaptativa encontrou o seu modelo na área de estudo da *Swarm Robotics*, que acabou se tornando a abordagem escolhida para a criação da solução de dispersão de pássaros empregada neste trabalho.

As próximas seções deste artigo estarão organizadas como se segue. Na seção 2 são abordadas as técnicas tradicionais para dispersão de pássaros. Na seção 3 são apresentados os conceitos básicos da *Swarm Robotics*, suas características e

A. P. da Silva, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil, alex.procopio@hotmail.com

R. I. S. Filho, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil, reginaldo.uspoli@gmail.com

F. A. Rodrigues, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil, fabricio.poliusp@gmail.com

propriedades. A seção 4 apresenta o experimento realizado e a seção 5 comenta os resultados obtidos. Por fim, a seção 6 trata da conclusão.

## II. TÉCNICAS TRADICIONAIS PARA DISPERSÃO DE PÁSSAROS

Nessa seção serão abordadas as técnicas de dispersão, ou **deslocalização**, mais usuais utilizadas pelos agricultores para reduzir os danos provocados por espécies de pássaros.

Embora os pássaros sejam fundamentais para os ecossistemas nos quais eles estão inseridos, sua concentração em áreas agrícolas pode afetar negativamente as culturas, quer seja pela contaminação, ou pelo consumo dos grãos ou frutos.

Em 2007, John Tracey, Quentim Hart, Glen Saunders e Ron Sinclair apresentaram um estudo [4] envolvendo aproximadamente 60 espécies de pássaros existentes na Austrália no qual abordam o comportamento de pássaros. Nesse trabalho é mencionado que, quando um pássaro é exposto a um evento inesperado ou desconhecido, uma de suas principais reações é a de voar. Essa pesquisa também alega que, devido à curiosidade do pássaro, cada vez que esse evento ocorre, o pássaro busca reunir informações sobre o estímulo que o assusta, acumulando informações suficientes para saber se o estímulo representa uma ameaça real ou não. Caso tal estímulo não represente uma ameaça, o pássaro se habitua a ele, passando a ignorá-lo.

A partir desses levantamentos os autores [4] apontam que o tempo necessário para o pássaro se habituar pode variar, dependendo de um conjunto de fatores, incluindo a espécie, o habitat circundante, a regularidade e o tipo de ruído. A habituação é o fator que mais limita a eficácia das técnicas empregadas para assustar os pássaros.

Como resultado das pesquisas realizadas na literatura, foram listados oito grandes grupos de abordagens utilizadas para a manipulação de concentrações de pássaros: manipulação por meio do som, pelo emprego da luz, por meio de predadores, por meio de modificação do habitat, pelo emprego do sistema de exclusão de compensação, pelo emprego de repelentes químicos, pelo uso de avicidas e outras soluções. Cada um desses grupos será apresentado a seguir.

### A. POR MEIO DE SOM E LUZ

Essa abordagem consiste em assustar o pássaro pelo uso de dispositivos acústicos. Entre esses dispositivos, podem ser utilizados equipamentos eletrônicos que reproduzam os sons emitidos por um pássaro quando ele avista um predador ou algo que lhe ameace, ou mesmo o som de um pássaro predador. Os equipamentos eletrônicos também podem reproduzir sons não biológicos, como ruídos eletrônicos [10]. Para evitar que os pássaros se habituem ao som, os dispositivos eletrônicos não devem emití-lo do mesmo ponto de origem, com o mesmo curto período de tempo e na mesma intensidade (volume).

O uso de dispositivos explosivos agrícolas [1][9] também pode criar sons que assustem os pássaros, entretanto, por causa dos riscos de incêndio associado a este dispositivo, medidas de prevenção devem ser adotadas. Outra solução envolve o uso de munição, as quais são disparadas por uma arma calibre 12. Embora seja mais acessível, é menos eficaz e envolve a

questão da segurança em utilizá-la próxima às áreas urbanas. [11]

O emprego de luz, por outro lado, consiste em assustar os pássaros por meio do uso de dispositivos que emitem ou refletem a luz. Nesse contexto, foram constatados diversos objetos introduzidos no meio da cultura, pendurados na vegetação ou em hastes, para refletirem ondas de luz de forma aleatória pelo movimento do vento [13]. Também são utilizados equipamentos eletrônicos, que são afixados no meio da plantação, emitindo flashes de luz de alta luminosidade em intervalos de tempo. A principal limitação dessa abordagem consiste, novamente, no fato dos pássaros se habituarem muito rapidamente aos feixes luminosos.

### B. POR MEIO DE PREDADORES

Essa técnica aborda o uso de predadores naturais, para sobrevoarem a vegetação, periodicamente, inibindo a presença de pássaros [14]. Entre as aves de rapinas empregadas, pode-se citar o falcão de coleira, o falcão peregrino e o gavião asa de telha, têm sido utilizados. Esses predadores, quando devidamente treinados e monitorados por especialistas, podem capturar os pássaros e trazê-los em suas garras, para serem presos em gaiolas e, posteriormente, soltos em áreas distantes. O problema dessa técnica consiste no alto custo do investimento, quando comparado com as outras técnicas, somado aos ferimentos ocasionados pela perseguição e captura realizada pelas aves de rapina e a dificuldade em levar os pássaros capturados para áreas distantes. [4]

Outra derivação consiste na utilização de bonecos denominados popularmente de espantalhos. Esses podem ter o formato de um ser humano ou de alguma ave de rapina [9]. Para maximar os resultados dessa abordagem, o espantalho deve ser o mais realista possível e posicionado em lugares com boa visibilidade. É interessante que ele tenha alguma mobilidade, para ajudar a evitar a habituação.

### C. POR MEIO DE MODIFICAÇÕES NO HABITAT E PELO EMPREGO DE SISTEMAS DE EXCLUSÃO DA COMPENSAÇÃO

As modificações no habitat incluem atividades que podem torná-lo menos atraente para os pássaros. Por exemplo, efetuar o desbaste ou poda da vegetação pode desencorajar os pássaros a utilizá-la como poleiro [12]. Apesar de menos custosa a longo prazo essa abordagem, sua desvantagem é que não pode ser empregada em culturas nas quais não se cabe a realização de poda, como por exemplo: soja, arroz, milho, entre outras.

Uma alternativa é o sistema de exclusão de compensação, que consiste em cobrir toda a vegetação, usando redes que impeçam fisicamente os pássaros terem acesso à cultura. Essa é uma das formas mais eficazes de deslocalização, porém é geralmente usada apenas em culturas de alto valor, de modo a compensar o investimento na implantação e manutenção dos equipamentos usados para remover as redes de forma eficiente.

### D. PELO EMPREGO DE REPELENTES QUÍMICOS E AVICIDAS

Repelentes químicos são substâncias normalmente pulverizadas sobre as culturas para impedir a presença de pássaros. Devido ao seu sabor, cheiro e cor, faz com que as

frutas percam sua atratividade para os pássaros. O problema advém dos resíduos nos alimentos, tornando-os inadequados para o consumo humano [8]. Uma variação dessa técnica é a utilização de algumas substâncias químicas conhecidas como avicidas. Em alguns casos (e com a autorização do governo) essas substâncias são dispostas no meio da vegetação em forma de iscas e tem a função de eliminar os pássaros. Os principais dilemas dessa abordagem são exatamente seus impactos sobre as espécies que não são os alvos e os seus efeitos residuais na cadeia alimentar. [10]

#### E. OUTRAS SOLUÇÕES

Além das soluções anteriormente citadas, verificou-se o uso de aeromodelos ou aviões controlados por operadores, utilizados para perseguirem os pássaros, combinando estímulos visuais e auditivos. [10]

Também foram encontradas orientações na literatura para evitar a implantação de lavouras próximas a banhados e bosques, uma vez que, em geral, esses lugares são *habitats* naturais de pássaros.

Apesar de tantas abordagens existentes para a dispersão de pássaros, verifica-se que, em geral, as práticas consideradas ecológicas precisam ser utilizadas de forma complementar a outras práticas, para que possam produzir melhores resultados. O objetivo de mesclar essas abordagens (luz, som, predadores, modificações no *habitat*, etc.) tem como objetivo impedir que os pássaros se acostumem com a técnica empregada de dispersão.

De uma maneira geral, percebe-se que todas as abordagens listadas se esgotam e têm sua limitação atrelada a dois fatores principais: o impacto negativo aos humanos e ao meio ambiente (como no caso da utilização de agentes químicos e dos desmatamentos) e a adaptação que os pássaros desenvolvem à sua utilização.

Assim, uma característica imprescindível em uma abordagem para dispersão de pássaros é a sua adaptatividade em relação ao comportamento dos animais. Pode-se afirmar mais: tal adaptatividade, presente na técnica de deslocalização, deve servir de resposta à adaptatividade presente no comportamento dos pássaros no processo de habituação. Em outras palavras, o problema da dispersão pede uma solução adaptativa pela sua própria natureza.

Foi pensando também na questão do impacto do meio ambiente que se procurou a abordagem oferecida pela *Swarm Robotics*. A ideia era a utilização de uma solução bio-inspirada (onde a adaptatividade é crucial) que minimizasse o impacto ao meio ambiente.

### III. A ORIGEM DO TERMO *SWARM ROBOTICS*

A *Swarm Robotics* é a área de estudo que pesquisa como um número relativamente grande de robôs pode ser fisicamente incorporado, de forma que um comportamento coletivo possa emergir a partir das interações locais entre cada integrante e entre os integrantes e o meio ambiente [17].

O termo *Swarm* foi introduzido no contexto da Robótica por Gerardo Beni [23] em 1988. A origem desse termo vem da biologia, inspirado no comportamento de animais sociais, aparecendo na computação com diferentes nomes, entre eles: *Swarm* [18], *Swarming* [19], *Swarm Intelligence* [20], *Swarm*

*Optimization* [21], *Swarm Engineering* e *Swarm Robotics* [22]. Apesar dessas diferentes nomenclaturas, a expressão recorrente na literatura na área de Robótica é *Swarm Robotics*, a qual se inspira na observação do comportamento de insetos sociais, entre os quais se encontram as formigas, cupins, vespas, abelhas, etc.

Em 1953, E. O. Wilson [24] descobriu que o comportamento da sociedade das formigas poderia ser explicado como um conjunto de padrões simples e fixos de ação, os quais seriam resultantes de estímulos provocados por substâncias químicas, chamadas de **feromônios**, produzidas pelas glândulas nas formigas. Os cupins também produzem essas substâncias e as utilizam para construir o cupinzal, depositando-as no solo em determinados locais, que determinam a construção, de forma descentralizada, dos pilares da cúpula da estrutura habitacional [25].

Outra grande parte da comunicação entre os insetos sociais é realizada indiretamente através de um comportamento que o entomologista Grassé, em 1959, intitulou de **estigmergia** [26]. Nesse contexto, uma mudança no ambiente proporciona uma sugestão que pode interferir no comportamento dos insetos. Em 1991, Deneubourg, junto a seu grupo de pesquisa, demonstrou que a formação de um cemitério de formigas é induzida por esse comportamento, sem nenhuma coordenação central, em função do ácido acético emanado dos corpos em decomposição das formigas mortas [27]. Eles observaram que algumas espécies de formigas, como a *Pheidole pallidula*, possuem uma característica de empilharem corpos, resultando na limpeza do formigueiro. Inicialmente, as formigas formam vários grupos distintos de corpos, em várias pilhas. Nesses grupos são constantemente adicionados e removidos corpos, e com o tempo, apenas os grupos de corpos que cresceram mais rapidamente prevalecem.

#### A. *SWARM ROBOTICS* E A ADAPTATIVIDADE

Pode-se perceber, até o momento, que a *Swarm Robotics* possui características interessantes: ela permite que seres com comportamentos individuais muito simples realizem, em grandes quantidades e juntos, atividades complexas. Mas como tal comportamento está relacionado com o conceito da adaptatividade ou mesmo da tecnologia adaptativa? Para tratar essa questão, devem-se observar os trabalhos de Mark M. Millonas e Erol Sahin, entre outros.

Millonas, em seus estudos sobre comportamentos coletivos de animais [28] também analisou algumas características que, ao longo do tempo, serviram como base para inspirar as pesquisas em *Swarm Robotics*. Uma das principais características listadas por ele é a **adaptatividade**, descrita como a capacidade de adequação às variações ambientais, de forma equilibrada, e mantendo a estabilidade do sistema. Tal capacidade de adequação é consequência de uma mudança comportamental no grupo de robôs e ocorrerá sempre que um novo investimento de energia for necessário. Retomando a inspiração biológica, tem-se, novamente, o exemplo dos cupins: quando há um evento catastrófico no seu *habitat*, os indivíduos do cupinzal iniciam a recolonização e a expansão da colônia para outras regiões. [29]

Já Sahin apresentou em suas pesquisas, entre outros assuntos, algumas propriedades funcionais que, de igual

modo, serviram de motivação para o estudo da *Swarm Robotics*; todas elas inspiradas na análise das características comportamentais de animais sociais [17]. Entre tais propriedades funcionais, encontra-se a flexibilidade e a estigmergia.

A **flexibilidade** é definida como uma consequência da **adaptatividade**, pois, através dela, o sistema tem a capacidade dinâmica de oferecer diferentes estratégias de coordenação, diante das mudanças de contexto no ambiente. Voltando ao exemplo das formigas, um formigueiro é capaz de responder imediatamente às novas condições ambientais [3]. Elas se adaptam para buscarem alimentos (uso de feromônios), para arrastarem presas para o ninho (recrutamento) e para ultrapassarem obstáculos (usando aglomerações, que servem como “pontes vivas”).

Por fim, a **estigmergia** consiste em uma forma de comunicação indireta, onde um indivíduo muda o ambiente, forçando os demais a reagirem a essa mudança, através de uma interação com os estímulos gerados pelas mudanças no local, realizando, assim, uma forma de comunicação limitada mediante a adaptação ao meio. Essa propriedade reduz a sobrecarga de informações trocadas entre os robôs e, em geral, cada integrante do *swarm* se comunica apenas com os seus vizinhos mais próximos, obtendo apenas informações locais.

Portanto, agora é possível responder à pergunta: “Existe relação entre a *Swarm Robotics* e a Tecnologia Adaptativa?” A resposta é sim. Desde que a adaptatividade, em termos da Tecnologia Adaptativa, é definida como a capacidade que tem um sistema de, sem a interferência de qualquer agente externo, tomar a decisão de modificar seu próprio comportamento, em resposta ao seu histórico de operação e aos dados de entrada [34], pode-se, sem perda de generalidade, associar o termo “dados de entrada” com o conceito de estímulos e o histórico de operação pode ser encarado com a “memória” advinda dos comportamentos próprios e consequentes da estigmergia e da ação dos feromônios. Portanto, conclui-se que o *swarm* de robôs (e não os robôs individualmente) compõe um Sistema Adaptativo.

#### IV. EXPERIMENTOS E RESULTADOS PRELIMINARES

Inicialmente a questão era determinar como um *grupo* de robôs poderia cobrir fisicamente a área agrícola, de modo que eles pudessem se mover próximos uns dos outros (em grupo), mas não tão perto a ponto de colidirem e nem tão longe a ponto de se dispersarem.

Como resposta para uma estratégia de controle dos robôs, verificou-se que uma possibilidade seria que eles se locomoverem formando um padrão de forma autônoma, o qual seria a estratégia de controle do **swarm de robôs**. Por padrão, entende-se um arranjo de objetos que determina um lugar geométrico, como por exemplo [2], topologias anel, estrela, malha, pirâmides, entre outras.

Nesse artigo definiu-se **swarm de robôs** como um grupo de robôs com características físicas idênticas (homogêneos), com capacidade de locomoção terrestre, que realizam as mesmas simples tarefas, possuidores de uma comunicação limitada com seus vizinhos e sem conhecimento da extensão da área que irão monitorar.

A abordagem de dispor os robôs geograficamente com base em formação de padrões permite usá-los para monitorar área de diferentes tamanhos, possibilitando que os robôs se locomovam de forma coesa (agrupada). Carlo Pinciroli é autor de um método de *Swarm Robotics* baseado nesse princípio [32] [30]. Com um comportamento auto-organizado, tal método se baseia no potencial de *Lennard-Jones (LJ)*, que consiste na descrição de um campo artificial local que determina uma estratégia de controle dos robôs através da formação de arranjos locais entre robôs vizinhos.

Pensando na questão da deslocalização dos pássaros uma disposição desejada é o de cerco. Na natureza existem animais que caçam em bando cercando suas presas. Como exemplo desse comportamento, Josué Ribeiro [39] e sua equipe mencionam que as garças podem unir-se às cegonhas (*Jabiru mycteria* e *Mycteria americana*) e caçar ativamente em bandos cercando cardumes de peixes. Eles também descrevem que os indivíduos de *Phalacrocorax brasilianus* (biguá) pescam em bandos de até duzentos indivíduos, cercando as presas para obter maior sucesso na captura. O *gavião-de-asa-telha* (*Parabuteo unicinctus*) caça em bandos de até seis indivíduos, o que permite cercar e capturar presas maiores, como lebres e coelhos [40].

Essa estratégia de cerco é um padrão onde o pássaro tende a ocupar o centro de uma área delimitada pelos integrantes do *swarm*, mantendo, assim, a distância entre os robôs em torno de um valor desejado. Tal abordagem, denominada de *flocking* auto-organizado é um comportamento coletivo amplamente verificado na natureza. Neste trabalho, foi definido como aplicar uma força derivada de um potencial *Lennard-Jones* para movimentar os robôs integrantes de um *swarm*, obtendo-se, dessa forma, movimentos ordenados que permitam o deslocamento coeso de todos os integrantes na realização de uma tarefa comum.

As interações entre robôs vizinhos, baseada no potencial de *Lennard-Jones*, seguem as regras descritas abaixo:

(a) Se dois objetos estão demasiadamente próximos, irão estar sujeitos a uma força de repulsão, afastando-os um do outro.

(b) Se estiverem muito longe, eles estarão sujeitos a uma força de atração, empurrando-os para perto um do outro.

(c) Se eles estão na distância desejada, nenhuma força atuará sobre eles.

Nesse contexto, o *flocking* auto-organizado é um *swarm* composto por uma nuvem de robôs. Cada robô verifica a sua distância em relação aos seus vizinhos, através das leituras dos seus sensores, e todas essas distâncias determinam o valor do campo potencial virtual. Esse valor é derivado em uma força e empregado na atuação das rodas de cada robô (frente, trás, virar). Desta forma, a nuvem de robôs tende a ir para a energia mínima de configuração. Essa força permite que os robôs se movam em grupo para uma posição na qual a distância entre os robôs seja igual.

A equação que determina o cálculo do potencial de *Lennard-Jones* [38] é descrita abaixo:

$$V(\rho) = \varepsilon \left[ \left( \frac{\delta}{\rho} \right)^{12} - 2 \left( \frac{\delta}{\rho} \right)^6 \right] \quad (1)$$

Onde:

- $\rho$  consiste na distância entre os robôs vizinhos.
- $\varepsilon$  consiste na profundidade do potencial, que consiste no coeficiente que permite aumentar a força de repulsão em função da intensidade da atração exercida.
- $\delta$  consiste na média da distância entre o diâmetro de dois objetos, na qual a força é mínima.

Do potencial, deriva-se o cálculo da força, descrito abaixo:

$$F(\rho) = -\nabla V(\rho) = \frac{12}{\rho} \varepsilon \left( \left( \frac{\delta}{\rho} \right)^{12} - \left( \frac{\delta}{\rho} \right)^6 \right) \quad (2)$$

Após a escolha da estratégia de controle dos robôs no espaço geográfico, o próximo passo era testá-la para verificar a sua viabilidade como solução. Para isso, optou-se pela realização de uma série de experimentos de simulação, como será abordado a seguir.

#### A. SIMULAÇÃO

A simulação representou a linha metodológica escolhida por uma série de motivos:

1. Um simulador torna possível testar ideias em um ambiente seguro, evitando possíveis danos aos robôs reais, que em geral, possuem um custo significativo; [31]
2. Uma experiência envolvendo um grande número de robôs pode ser muito cara, inviabilizando o projeto. Simulações têm um custo bem menor;
3. As simulações podem ser repetidas várias vezes, com todas as variações de parâmetros possíveis;
4. Permite a aplicação dos algoritmos de controle do *swarm* em um ambiente 3D.

As buscas se concentraram em simuladores gratuitos e *open-source*. A escolha recaiu no simulador ARGoS (*Autonomous Robot Go Swarming*) [32] que foi utilizado como ferramenta para as experiências de simulação. Esse simulador foi concebido e desenvolvido por Carlos Pincirol, do *Institut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle (IRIDIA)*.

O ARGoS é um simulador 3D *open source*, específico para simulações voltadas para a abordagem de *Swarm Robotics*. Ele funciona em Linux e Mac OSX e foi desenvolvido durante o projeto *Swarmanoid*, o qual tem por objetivo o estudo de ferramentas e estratégias de controle de *swarm* de robôs. O ARGoS suporta os robôs *swarmanoid* e *e-puck* [31] e o código de controle do robô é escrito na linguagem de programação orientada a Objeto C++, usando configurações através de arquivos XML.

O simulador foi instalado em um computador contendo o sistema operacional Ubuntu 64 bits, versão 12.04, processador Intel Core i7 Q740@1,73GHz e 8 Gb de memória. Ele apresentou um bom funcionamento e um bom desempenho, permitindo verificar a flexibilidade e a eficiência do simulador. A **eficiência** foi obtida por meio de uma arquitetura *multithread*, visando à otimização do uso da CPU. Nesse contexto, a eficiência refere-se a capacidade de executar experimentos envolvendo vários robôs no menor tempo possível. Isso permite que a simulação contenha um número

elevado de robôs sem perder o desempenho. Uma característica marcante nesse simulador é que, no ambiente 3D simulado, o espaço da simulação pode ser dividido em subespaços, e cada um deles pode ser administrado por diferentes tipos de gerenciadores de leis físicas. [31]

Já a **flexibilidade** foi obtida por meio de uma arquitetura orientada a *plug-ins* (através dos quais é possível obter modelos de robôs, sensores, atuadores, visualizações e outros). Os usuários podem escolher quais *plug-ins* utilizar para cada aspecto da simulação e atribuir recursos apenas aonde interessa [33]. Essa característica permite que o usuário obtenha apenas os recursos necessários para a simulação.

#### B. DINÂMICA DA SIMULAÇÃO

O objetivo do experimento foi simular um *swarm* de robôs monitorando uma área e expulsando o pássaro invasor do local, segundo um modelo de controle por meio de formação de padrões. Nesse contexto, foi utilizado o método do potencial de *Lennard-Jones* para ser a estratégia de controle empregando o algoritmo *Flocking*.

Cada integrante do *swarm* de robôs é representado na simulação como um robô do tipo *foot-bot* [35]. Esse é um robô móvel com sensores e atuadores. O sensor de luz permite que o robô calcule sua distância em relação à outra fonte de luz presente no espaço [37]. Através do dispositivo de comunicação *range-and-bearing* [39] cada robô pode se comunicar com seus vizinhos. Os robôs possuem duas rodas com movimentos de direção e velocidades independentes.

A região agrícola que será monitorada na simulação é representada por uma arena quadrada, com área de 400 m<sup>2</sup>.

Inicialmente os 14 robôs são dispostos em uma área quadrada (ponto inicial) de 1 m<sup>2</sup>, dentro da arena, nas coordenadas  $(x=4; y=4)$  a  $(x=5; y=5)$ , conforme imagem da Figura 1.

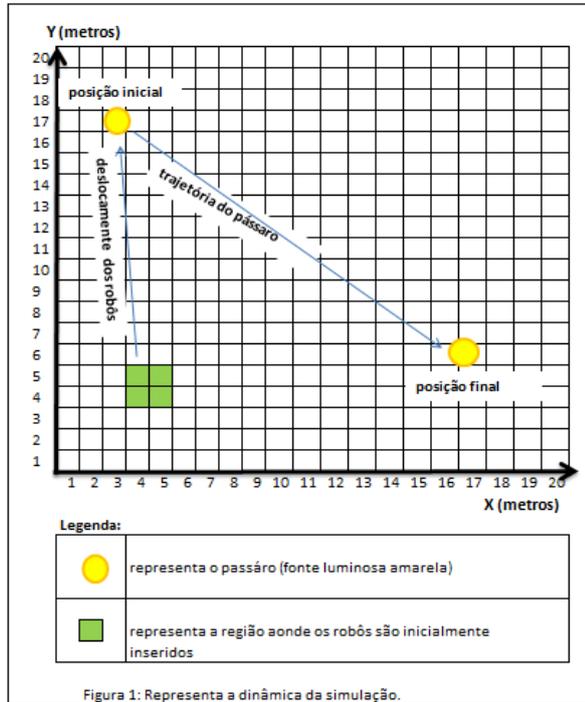
Cada robô possui um dispositivo de identificação, mais especificamente um *led*, de forma que todos os robôs que pertencem ao *swarm* possuem um *led* aceso na cor vermelha.

Na arena também são dispostos outros elementos que irão compor o cenário, entre eles vários cilindros estáticos que possuem massa de 0,5 kg e raio de 10 cm, que se encontram distribuídos em fileiras representando a vegetação.

Também é inserida uma fonte luminosa na cor amarela que representa o pássaro. Durante a execução da simulação a trajetória do pássaro será do ponto inicial  $(x=3; y=17)$  até o ponto final  $(x=17; y=6)$ , conforme imagem da Figura 1.

Ao iniciar a execução da simulação, os robôs são lançados aleatoriamente nas posições pertencentes da região do ponto inicial, representado na cor verde na imagem da Figura 1. Em seguida cada robô realiza a leitura de seus sensores para verificar se localizam a fonte de luz amarela, a sua distância em relação à fonte e a sua distância em relação a cada um dos seus vizinhos que possuem um *led* aceso na cor vermelha. Para isso, é estipulada uma determinada distância para limitar o número de vizinhos mais próximos que ele considerará para o cálculo. Com base nessas distâncias é iniciado o cálculo da força de interação de *Lennard-Jones* para todos os robôs. Esse cálculo permite a coesão na realização da tarefa. Dessa forma cada integrante do enxame de robôs que antes estavam muito

próximos um dos outros passam a se repelir e a se atrair se distanciando uns dos outros.



Em seguida o *swarm* de robôs se desloca agrupado, em direção ao pássaro. A cada instante de tempo o pássaro vai se movimentando do seu ponto inicial até o seu ponto final e os robôs permanecem cercano-o. Durante toda a trajetória do pássaro ele permanece na altura constante de 1 metro.

Observa-se nessa simulação que o pássaro inicia o voo do ponto inicial até o ponto final. Abstraiu-se de que nessa trajetória o pássaro continuamente pousa na vegetação e os robôs procuram cercá-lo, no próximo instante o pássaro volta a voar pousando na próxima vegetação e os robôs sucessivamente tentam cercá-lo até retirá-lo da região agrícola.

O algoritmo *Flocking* utilizado para execução da simulação é descrito a seguir.

```

1 Algoritmo
2
3 (x1,y1)=VectorToLight(); //cálculo do ângulo da fonte de luz
4 (x2,y2)=FlockingVector(); //cálculo da força resultante dos vizinhos
5 angulo = CalculeAngulo (x1+x2, y1+y2); //ângulo que o agrupamento se
deslocara
6 (vel1, vel2)= CalculaVelocidade(angulo); //cálculo da força da velocidade
7 robot.wheels.set_velocity (vel1, vel2); //aplicação da velocidade nas rodas
8
9 fim algoritmo
    
```

As principais funções do algoritmo *Flocking* são descritas a seguir:

- **VectorToLight()**: tem por objetivo realizar o cálculo do ângulo do objeto, segundo as leituras dos sensores do robô.
- **FlockingVector()**: realiza o cálculo da força resultante dos vizinhos.
- **CalculeAngulo()**: calcula o ângulo que o agrupamento seguirá.
- **CalculaVelocidade()**: recebe a direção do vetor que deve seguir e a transforma em uma sequência de atuação nas rodas, aplicando a velocidade adequada.

Durante a execução do algoritmo *Flocking*, cada robô integrante do *swarm* se locomove de tal forma que não fique próximo demais, a ponto de colidir com seu vizinho, nem tão longe a ponto de se dispersar e não contribuir para a formação padrão. Para viabilizar essa simulação, foram alterados os códigos fontes do algoritmo *Flocking* do simulador ARGoS, ao se criar o método *MyLoopFunctions* para ser invocado em intervalos de tempo previamente definidos, de modo a permitir a simulação da movimentação do pássaro.

É interessante destacar que cada robô possui 24 sensores de luz dispostos em forma circular. Cada sensor emite uma leitura que varia entre os valores 0 e 1. A cada execução da função *VectorToLight()* é realizada uma leitura dos valores dos sensores de cada robô do *swarm* e convertidos esses valores em coordenadas cartesianas através da multiplicação dos valores do ângulo aonde o sensor está posicionado pelo valor da leitura do sensor. Ao resultado desse produto de cada robô, é calculado os cossenos e senos, obtendo-se as coordenadas X e Y, para que os robôs possam se deslocar de forma agrupada e coesa.

A velocidade de cada robô é calculada com base nos ângulos que representam a posição onde se encontra o pássaro e a posição que representa a coesão para a locomoção do *swarm*.

## V. RESULTADOS

A Figura 2 ilustra o início da execução da simulação. Ela apresenta a arena na qual estão dispostos 14 robôs. Verifica-se que os robôs possuem um *led* aceso na cor vermelha indicando que pertencem ao mesmo *swarm* de robôs.

Também é possível verificar a vegetação representada pelos cilindros enfileirados na cor cinza. Percebe que inicialmente os robôs se encontram muito próximos um do outro sem nenhum padrão específico. Tal situação está ilustrada na imagem da Figura 2.

Dentro da arena e no meio dos cilindros (vegetação), é inserida uma esfera amarela que representa a fonte luminosa, a qual se desloca acima da superfície a uma altura de 1 metro. Essa esfera possui mobilidade e é identificada pelos sensores de luz dos robôs como uma fonte luminosa amarela. Tal esfera, em nossa simulação, representa o pássaro voando no meio da plantação.

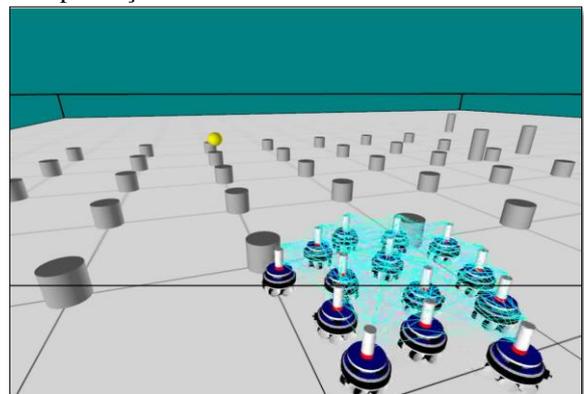


Figura 2: Início da simulação

Na Figura 3 percebe-se que cada robô realiza o cálculo da

força de interação de *Lennard-Jones* e os robôs que antes estavam muito próximos uns dos outros passam a se repelir e a se atrair gerando um padrão de formação.

A Figura 4 representa o momento em que o *swarm* detecta o pássaro e começa a se movimentar em sua direção, de forma coesa, para cercá-lo. Não importa se apenas um robô detecta o pássaro, ou mais de um consiga detectá-lo, pois, uma vez localizado pelo *swarm*, o pássaro passa a ser perseguido por ele. O *swarm* reage adaptativamente às mudanças de trajetória do pássaro mantendo a perseguição ao mesmo e evitando os cilindros em meio à plantação.

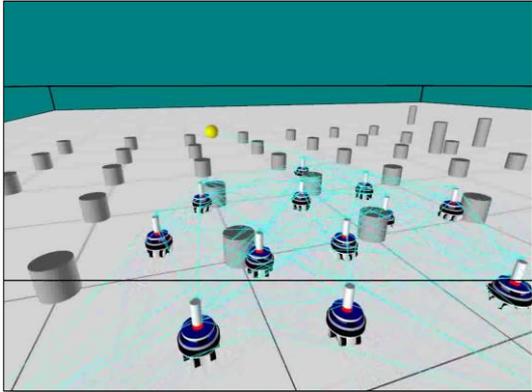


Figura 3: Enxame de robôs monitorando a área.

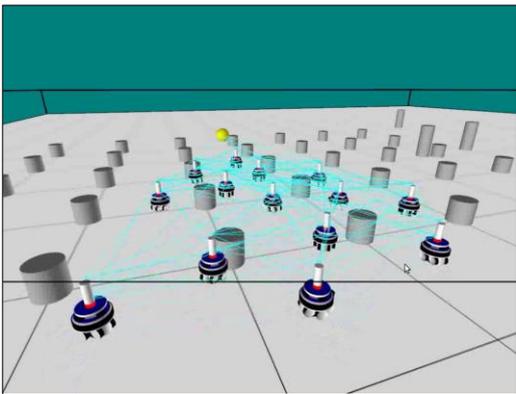


Figura 4: Robôs perseguindo o pássaro em movimento

As Figuras 5 e 6 ilustram os momentos finais da simulação, no instante em que os robôs geram um padrão de cerco em volta do pássaro na plantação. Percebe-se que tal padrão adquire a forma de um polígono, onde o pássaro ocupa o centro, exatamente como o desejado.

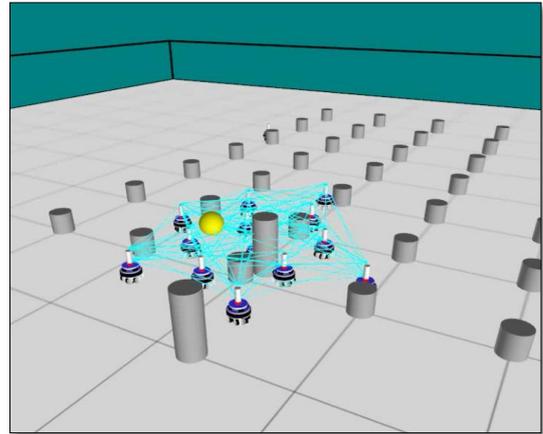


Figura 5: Robôs removendo o pássaro da vegetação.

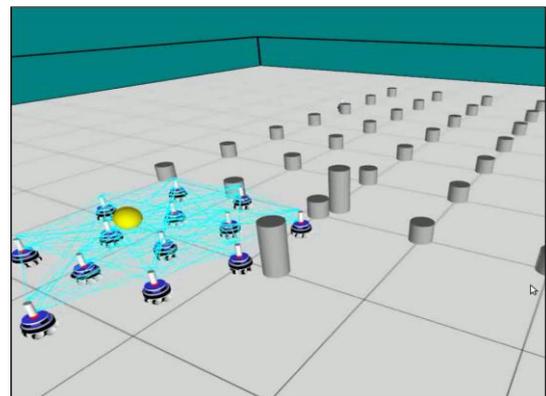


Figura 6: Finalização do processo de remoção do pássaro.

## VI. CONCLUSÃO

Cabe recordar as indagações sobre as quais se construiu a pesquisa apresentada neste trabalho. A primeira questionava a possibilidade de obter um método ecológico e alternativo para a deslocalização dos pássaros em plantações. As simulações demonstraram que isso é possível. A nova abordagem não utiliza agentes químicos (repelentes ou avicidas) e não é necessária a realização de poda na plantação.

A próxima questão levantava o problema da habituação dos pássaros às técnicas tradicionais. Na ocasião, observou-se que uma nova técnica só poderia anular a adaptatividade dos pássaros se fosse, ela mesma, adaptativa.

Assim, chegou-se à abordagem da *Swarm Robotics* e, mais especificamente, à implementação da solução baseada em um padrão de cerco mediante o uso da técnica que lança mão da utilização do potencial de *Lennard-Jones*. Com base nos resultados obtidos por meio da simulação realizada, verificou-se que a aplicação do método do potencial de *Lennard-Jones* é uma boa estratégia para o controle de um *swarm* de robôs para o objetivo proposto. Ele permite que o grupo de robôs se mova em forma coesa, tal qual um grupo de insetos sociais faria, mantendo o alinhamento, a atração e a repulsão entre os integrantes do grupo.

Essa estratégia de controle possibilita o monitoramento da área por todos os integrantes do enxame simultaneamente, cercado o pássaro mesmo enquanto ele voa de um local para o outro, até dispersá-lo da região agrícola.

Como parte da sequência a ser dada à pesquisa e a esse trabalho, pode-se investigar uma série de outros caminhos interessantes. Um deles consiste em realizar a simulação com uma quantidade maior de pássaros e estudar as implicações ocasionadas por essa mudança.

Outro caminho consiste no uso de robôs reais e a análise do comportamento do *swarm* em um ambiente agrícola também real. Outro ponto para futuros trabalhos diz respeito ao uso de quadrotos (veículos aéreos impulsionados por quatro hélices) robóticos, pois ter robôs que voam tal quais os pássaros pode abrir todo um novo leque de possibilidades.

Existem estudos interessantes que também envolvem os aspectos teóricos. Uma análise que será realizada consiste na aplicação dos Autômatos Adaptativos na programação dos robôs que integram o *swarm* e estudar a composição do comportamento dos Autômatos Adaptativos com a abordagem da *Swarm Robotics*. Com um sistema híbrido que combinasse as duas abordagens, existe a possibilidade de um ganho significativo de desempenho para a solução apresentada neste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- [1] BOOTH, T. W. Bird dispersal techniques. United States Department of Agriculture, 1994.
- [2] MEDINA, A. J. R.; PULIDO, G. T.; RAMÍREZ-TORRES, J. G. A comparative study of neighborhood topologies for particle swarm optimizers. In: . c2009. p. 152-159.
- [3] TRIANNI, V. Evolutionary swarm robotics: evolving self-organising behaviours in groups of autonomous robots. Springer, 2008. v. 108.
- [4] TRACEY, J.; MARY, B.; HART, Q.; SAUNDERS, G.; SINCLAIR, R. Managing bird damage to fruit and other horticultural crops. Bureau of Rural Sciences, Canberra, 2007.
- [5] NETO, J. R. S.; GOMES, D. M. Predação de milho por *arara-azul-de-leal anodorhynchus leari* (bonaparte, 1856) (aves: Psittacidae) em sua área de ocorrência no sertão da Bahia, 2007.
- [6] JACINTO, J. C.; TOTI, T. P.; GUARITA, R. L.; MELO, C. Dano em um cultivo de sorgo (sorghum bicolor) causado por aves. In: . c2007.
- [7] GOMES, A. D. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. Arroz irrigado no sul do Brasil. Embrapa Clima Temperado; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.
- [8] CLARK, J. P.; HYGNSTROM, S. E. Horned larks. The Handbook Prevention and Control of Wildlife Damage, p. 64, 1994.
- [9] HALL, T. C. Magpies. The Handbook: Prevention and Control of Wildlife Damage, 1994.
- [10] DOLBEER, R. A. Blackbirds. Denver Wildlife Research Center, 1994.
- [11] GODIN, A. J. Os pássaros nos aeroportos. O Manual: Prevenção e Controle da Vida Selvagem Danos, p. 56, 1994.
- [12] JOHNSON, R. J. American crows. Denver Wildlife Research Center, 1994.
- [13] MEDEIROS, A. R. M. Figueira do plantio ao processamento caseiro. EMBRAPA-Circular Técnica, número 35, 2002.
- [14] OF AGRICULTURE OF GOVERNMENT OF AUSTRALIA, D. Best practice guidelines for bird scaring in orchards noise and threatened species. Government of Australia, 2009.
- [15] ARAUJO, A.; PORTUGAL, D.; COUCEIRO, M.; ROCHA, R. Integrating arduino-based educational mobile robots in ROS. Proceedings of IEEE 13th International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, p. 8-13, 2013.
- [16] DOITSIDIS, L.; WEISS, S.; RENZAGLIA, A.; ACHELNIK, M. W.; KOSMATOPOULOS, E.; SIEGWART, R.; SCARAMUZZA, D. Optimal surveillance coverage for teams of micro aerial vehicles in GPS-denied environments using onboard vision. Journal Autonomous Robot, v. 33, p. 173-188, 2012.
- [17] SAHIN, E. Swarm robotics - from sources of inspiration to domains of application. Technical report, Middle East Technical University, 2005.
- [18] BENI, G. From swarm intelligence to swarm robotics. Workshop on Swarm Robotics. 8th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB), 2004.
- [19] TOPAZ, C. M.; BERTOZZI, A. L. Swarming patterns in a two-dimensional kinematic model for biological groups. SIAM Journal on Applied Mathematics, v. 65, n. 1, p. 152-174, 2004.
- [20] BENI, G.; WANG, J. Swarm intelligence in cellular robotic systems. Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?, p. 703-712, 1993.
- [21] COLORNI, A.; DORIGO, M.; MANIEZZO, V. Distributed optimization by ant colonies. In: c1991. p. 134-142.
- [22] DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. Evolutionary Computation, v. 1, n. 1, p. 53-66, 1997.
- [23] BENI, G. The concept of cellular robotic systems. Proc. 3rd IEEE International Symposium on Intelligent Control, p. 57-62, 1988.
- [24] HÖLDOBLER, B.; WILSON, E. O. The ants. Harvard University Press, 1990.
- [25] KENNEDY, J. Swarm intelligence. Springer, 2006.
- [26] GRASSÉ, P.-P. La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* e *Cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie: Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. Insectes sociaux, v. 6, n. 1, p. 41-80, 1959.
- [27] DENEUBOURG, J.-L.; GOSS, S.; FRANKS, N.; SENDOVA-FRANKS, A.; DETRAIN, C.; CHRÉTIEN, L. The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots. In: . c1991. p. 356-363.
- [28] MILLONAS, M. M. Swarm, phase transitions, and collective intelligence. C.G. Langton, 1994.
- [29] FILHO, J. C. M. Dissertação: Modelos computacionais para o processo de forrageamento e facilitação social em cupins. Universidade Federal de Viçosa, 2007.
- [30] PINCIROLI, C.; BIRATTARI, M.; TUCI, E.; DORIGO, M.; DEL REY ZAPATERO, M.; VINKO, T.; IZZO, D. Self-organizing and scalable shape formation for a swarm of pico satellites. In: . c2008. p. 57-61.
- [31] PINCIROLI, C.; TRIANNI, V.; OGRADY, R.; PINI, G.; BRUTSCHY, A.; BRAMBILLA, M.; MATHEWS, N.; FERRANTE, E.; CARO, G.; DUCATTELLE, F.; STIRLING, T.; GUTIERREZ, A.; GAMBARDELLA, L. M.; DORIGO, M. ARGoS a modular, parallel, multi-engine simulator for multi-robot systems. Swarm Intelligence, Berlin, Germany, v. 6, n. 4, p. 271-295, 2012.
- [32] PINCIROLI, C.; TRIANNI, V.; OGRADY, R.; PINI, G.; BRUTSCHY, A.; BRAMBILLA, M.; MATHEWS, N.; FERRANTE, E.; CARO, G.; DUCATTELLE, F.; STIRLING, T.; GUTIERREZ, A.; GAMBARDELLA, L. M.; DORIGO, M. Argos a modular, multi-engine simulator for heterogeneous swarm robotics. Los Alamitos, CA, p. 5027-5034, September 2011.
- [33] BHAUMIK, A. Open source robotics: Multi-robot simulators. Linux For You, v. 10, n. 2, p. 48-50, 2012.
- [34] NETO, J. J.; Um levantamento da evolução da adaptatividade e da tecnologia adaptativa. Revista IEEE América Latina, 2007, v. 5, n. 7.
- [35] BONANI, M.; LONGCHAMP, V.; MAGNENAT, S.; Rétornaz, P.; BURNIER, D.; ROULET, G.; VAUSSARD, F.; BLEULER, H., and MONDADA, F. (2010). The MarXbot, a Miniature Mobile Robot Opening new Perspectives for the Collective-robotic Research. In 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010), p. 4187-4193, Piscataway, NJ. IEEE Press.
- [36] ROBERTS, J., STIRLING, T., ZUERREY, J., and FLOREANO, D. (2009). 2.5d infrared range and bearing system for collective robotics. In Papanikolopoulos, N., Sugano, S., Chiaverini, S., and Meng, M., editors, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Piscataway, NJ. IEEE Press.
- [37] STRANIERI, A.; TRIANNI, V.; FERRANTE, E.; DORIGO, M.; PINCIROLI, C. Self-Organized Flocking with a Heterogeneous Mobile Robot Swarm. Advances in Artificial Life, ECAL (2011): 789-796, MIT Press, Cambridge, MA.
- [38] KITTEL, C. Introduction to Solid State Physics. Editora John Wiley. Inc. New York, 1976.
- [39] NUNES, J. R. S.; OKI, YUMI; CARMIGNOTTO, A. P.; TELLO, P. G. Distribuição de frequência de habitats por aves aquáticas piscívoras do Lago Camaleão, Ilha da Marchantaria, Amazonas, Curso de Campo Ecologia da Floresta Amazônica, Brasil, 2002.
- [40] Menq, W. Aves de rapina e suas técnicas de caça. Aves de Rapina BR - Águias, gaviões, falcões e corujas do Brasil. Brasil, 2013.



Alexsandro Procópio da Silva é graduado em Análise de Sistemas (2001) e Especialista em Engenharia de Web Sites (2004), ambos pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, MS, Brasil. Mestrando em Computação Aplicada também pela UFMS desde 2013. Atualmente é Perito Criminal da Polícia Civil de MS (2009), lotado no Instituto de Criminalística de MS e suas pesquisas se concentram na área da Computação Forense e Robótica.



Reginaldo Inojosa da Silva Filho, possui graduação em Engenharia de Computação (em 2002), mestrado em Sistemas Eletrônicos (2006) e doutorado em Engenharia de Computação (2012), ambos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, no Campus de Ponta Porã. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Teoria da Computação. Atuando principalmente nos seguintes temas: Adaptatividade, Sistemas Complexos, Teoria Algorítmica da Informação e Teoria dos Autômatos.



Fabrício Augusto Rodrigues é Doutor em Ciências, com ênfase em Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2012), Mestre em Informática pela Universidade Federal de Campina Grande (2002) e Bacharel em Sistemas de Informação pela Universidade Potiguar (1999). Atua na área da Ciência da Computação, cujas pesquisas estão relacionadas principalmente com as subáreas de Inteligência Artificial e Informática para Biodiversidade. Atualmente, é professor efetivo da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, no Campus de Ponta Porã. Dentre os seus interesses de pesquisa, destacam-se: Redes Neurais Artificiais, Algoritmos de Modelagem de Nicho Ecológico, Algoritmos Paralelos, Análise de Desempenho de Algoritmos, Tecnologia Adaptativa, Aprendizagem de Máquina, Atenção Visual e Visão Computacional.