

# Utilizando Redes Neurais Artificiais no Controle de Robôs Móveis Aplicados ao Combate de Incêndios Florestais

Gustavo Pessin<sup>1</sup>, Fernando Osório<sup>1</sup>, Soraia Musse<sup>2</sup>, Vinícius Nonnemacher<sup>3</sup>,  
Sandro Souza Ferreira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PIPCA – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)  
Av. Unisinos 950 – São Leopoldo – RS – Brasil

<sup>2</sup>Faculdade de Informática – PUC-RS  
Av. Ipiranga, 6681 – Porto Alegre – RS – Brasil

<sup>3</sup>GT JEDi – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)  
Av. Unisinos 950 – São Leopoldo – RS – Brasil

fosorio@unisinos.br, soraia.musse@pucrs.br, {pessin, vnonnemacher,  
sandro.s.ferreira}@gmail.com

***Resumo.** O objetivo deste artigo é detalhar o projeto e o desenvolvimento de um sistema multi-agente que opera em um ambiente virtual de simulação realística<sup>1</sup>. Neste sistema, uma equipe heterogênea de agentes autônomos trabalha cooperativamente a fim de realizar com sucesso a identificação e o combate de incêndios florestais, sem intervenção humana. Os robôs de combate são fisicamente simulados e as informações sensoriais de cada robô (e.g. GPS, bússola, sonar) servem de entrada para uma Rede Neural que controla os atuadores do veículo para assim realizar navegação com desvio de obstáculos de um ponto aleatório do terreno até um ponto de atuação no combate ao incêndio. Os resultados das simulações demonstram que a Rede Neural controla satisfatoriamente os robôs móveis e que o sistema proposto pode vir a ter um papel muito importante no planejamento e execução de operações reais de combate a incêndios florestais.*

## 1. Introdução

Com a evolução das pesquisas em robótica, cada vez mais os robôs estão se tornando complexos em termos físicos. A grande variedade de estudos em morfologia robótica tem desenvolvido variações de robôs dotados de diversos meios de locomoção (e.g. pernas, rodas, esteiras). Em paralelo a este desenvolvimento temos a evolução constante de uma gama extremamente grande de sensores (e.g. sistemas de visão, posicionamento, detecção de obstáculos). O desenvolvimento de algoritmos e técnicas para coordenar estes conjuntos físicos em um ambiente dinâmico é um desafio extremamente complexo [Go et al. 2004]. Dotar robôs autônomos de capacidade de raciocínio inteligente e de interação com o meio em que estão inseridos é uma área de pesquisa que tem atraído a atenção de um grande número de pesquisadores [Dudek and Jenkin 2000]. Existem diversas áreas onde a habilidade de um único agente autônomo não é suficiente ou

---

<sup>1</sup> Código-fonte e vídeos das simulações disponíveis em <http://pessin.googlepages.com>

eficiente para a realização de uma tarefa, em alguns destes casos, como patrulhamento, vigilância, resgate ou exploração o mais indicado é a aplicação de sistemas multi-robóticos. Sistemas multi-robóticos são sistemas onde robôs autônomos trabalham cooperativamente a fim de cumprir uma missão, podendo existir interação entre os robôs ou não [Osagie 2006].

Um grande sonho de nossa sociedade é a aplicação de sistemas robóticos substituindo atividades que coloquem em risco a vida humana, em atividades onde a atuação de humanos é deficitária ou onde a atuação humana de certa forma é ineficiente. A tarefa de monitoração e combate de incêndios em áreas florestais é um caso onde a aplicação de um sistema multi-robótico poderia diminuir consideravelmente os prejuízos humanos, materiais e ambientais. Com relação a incêndios florestais, anualmente registram-se cerca de 45.000 incêndios nas florestas da Europa. Entre 1989 e 1993, só na zona mediterrânea 2,6 milhões de hectares florestais foram destruídos pelo fogo, o equivalente ao desaparecimento do mapa de um território com a dimensão da Bélgica em cinco anos [CE 2006]. Os incêndios florestais causam diversos tipos de danos humanos, materiais e ambientais. Danos ambientais na fauna e flora afetam desde o solo até o aspecto de sobrevivência de áreas não incendiadas, prejudicando os ambientes naturais e o planejamento florestal. As perdas humanas são mais dramáticas, onde este custo dificilmente pode ser quantificado. Quanto a prejuízos humanos, por exemplo, na Austrália, em 1983 um incêndio que atingiu cerca de 400.000ha matou 75 pessoas. No Canadá e EUA, incêndios entre 1969 e 1994 mataram cerca de 52 pessoas. No Brasil, um incêndio no Paraná, em 1973 provocou 110 mortes [LIF 2006]. A extensão territorial do Brasil e a diversidade de sua cobertura vegetal, bem como o número expressivo de ocorrências de incêndios florestais verificados no país, são fatores que enfatizam a necessidade de um sistema cada vez mais aprimorado e consistente de detecção e combate de incêndios florestais [Batista 2004]. Diversas iniciativas a fim de incrementar a capacidade de reação de órgãos públicos e civis no sentido de evitar desastres tem sido uma das preocupações junto a órgãos como a Secretaria Nacional de Defesa Civil, levando a criação de novos CEPEDs (Centro de Estudos para a Prevenção de Emergências e Desastres). Importantes iniciativas, como a RBV – Rede Brasileira de Visualização, financiada pela FINEP, também tem sido incentivadas, onde a competência de Segurança e Defesa (Civil e Militar) da Rede vem sendo foco de desenvolvimentos junto a nossa Universidade e na qual este projeto se integra.

Nossas principais metas neste projeto são: (i) Recolher informações sobre dados florestais, tipos de vegetação, topografia, e comportamento de incêndios para criar o ambiente virtual mais realista possível; (ii) Simular incêndios em florestas, reproduzindo de forma bastante realista o ambiente e a propagação dos focos de incêndio; (iii) Pesquisar ferramentas e técnicas de combate à incêndios florestais utilizadas por bombeiros; (iv) Implementar a simulação de agentes móveis autônomos colaborativos capazes de formar uma brigada de combate a incêndios; (v) Estudar métodos de aprendizado de máquina e suas vantagens para o modelo; e (vi) Estudar a robustez das ações dos agentes pela leitura de dados de sensores sujeitos a erros.

Neste artigo apresentamos na Seção 2 características importantes de robótica móvel que tenham relação com as necessidades deste trabalho. Na Seção 3 descrevemos brevemente conceitos de simulação e modelagem, as ferramentas pesquisadas e as bibliotecas de simulação selecionadas para o desenvolvimento do trabalho. Na Seção 4

descrevemos técnicas e operações reais de identificação e combate a incêndios florestais. Na Seção 5 descrevemos o ambiente desenvolvido, a operação multi-agente de identificação e combate, o desenvolvimento e a aplicação da Rede Neural no controle dos robôs móveis. Finalizamos apresentando a conclusão do trabalho realizado.

## **2. Robótica Móvel**

Um robô móvel é um dispositivo mecânico montado sobre uma base não fixa, que age sob o controle de um sistema computacional, equipado com sensores e atuadores que o permitem interagir com o ambiente [Marchi 2001, Bekey 2005]. A interação com o ambiente se dá através de ciclos de percepção-ação que consistem em três passos fundamentais: (i) Obtenção de informação através de sensores; (ii) Processamento das informações para seleção de ação; e, (iii) Execução da ação através do acionamento dos atuadores.

Esse conjunto de operações, em uma análise superficial, pode parecer simples, porém o controle robusto de sistemas robóticos tem complicações físicas e mecânicas (como cinemática e dinâmica), eletrônicas (como falta de precisão de sensores) e computacionais que tornam a criação de um conjunto de regras uma tarefa árdua e sujeita a erros. Sensores são os mecanismos de percepção de um robô e realizam medições físicas (*e.g.* contato, distância, orientação, temperatura), provêm sinais ou dados crus que precisam ser interpretados pelo “cérebro” do robô. A interpretação destes sinais deve ser a única maneira de um robô autônomo entender o ambiente que o cerca para poder realizar as mudanças de ação necessárias [JPL/NASA 2007]. Atuadores são os mecanismos de ação de um robô (*e.g.* motores, pistões, braços manipuladores), controlados por circuitos eletrônicos que recebem valores de ação, valores estes que devem ser calculados pelo “cérebro” do robô e devem estar de acordo com especificações de fabricantes [JPL/NASA 2007].

## **3. Simulação e Modelagem**

Experimentos em robótica móvel podem ser realizados de duas formas: diretos em um robô real ou em um robô simulado em um ambiente virtual realista [Pfeifer e Scheier 1999]. Usualmente, experimentos em robótica móvel utilizando um robô real exigem enorme despendimento de tempo e de recursos financeiros. Para que seja possível a implementação física real, o sistema multi-agente que propomos deve ser projetado, desenvolvido e testado anteriormente em ambientes de simulação realísticos. A simulação de sistemas robóticos é especialmente necessária para robôs caros, grandes, ou frágeis [Go et al. 2004]. É uma ferramenta extremamente poderosa para agilizar o ciclo de desenvolvimento de sistemas de controle robóticos eliminando desperdício de recursos, tanto financeiros como computacionais. Para que uma simulação seja útil, entretanto, ele deve capturar características importantes do mundo físico, onde o termo *importantes* tem relação ao problema em questão [Go et al. 2004]. No caso deste trabalho, é fundamental que existam restrições físicas no modelo e que exista a possibilidade de trabalho em um terreno irregular, provido de obstáculos. Para o desenvolvimento deste trabalho foram pesquisadas algumas ferramentas de simulação, porém, nenhuma mostrou possuir o conjunto completo das características requisitadas. Uma pequena descrição de cada uma das ferramentas pesquisadas é fornecida a seguir.

O *Microsoft Robotics Studio* ([msdn.microsoft.com/robotics](http://msdn.microsoft.com/robotics)) tem como objetivo prover um ambiente para desenvolvimento de simulação robótica. Permite a simulação em terrenos irregulares e é livre apenas para uso não comercial. O desenvolvimento dos sensores, dos controles inteligentes e da comunicação entre os robôs depende de programação (e.g. C#, VB.NET). O *Webots* ([www.cyberbotics.com](http://www.cyberbotics.com)) é um simulador de robôs móveis que tem como base a biblioteca de simulação física ODE, inclui modelos prontos de alguns robôs comerciais e modela sensores com a capacidade de detecção de obstáculos, visão, e manipuladores simples. O usuário pode programar cada robô utilizando C/C++. É um produto comercial. Outros ambientes de simulação estudados foram o *Khepera Simulator* ([diwww.epfl.ch/lami/team/michel/khep-sim](http://diwww.epfl.ch/lami/team/michel/khep-sim)), o *Mission Simulation Facility* ([ase.arc.nasa.gov/msf](http://ase.arc.nasa.gov/msf)), o *JUICE* ([www.natew.com/juice](http://www.natew.com/juice)) e o *Simulator BOB* ([www.tu-harburg.de/ti6/mitarbeiter/pst/Sim/Simulator.html](http://www.tu-harburg.de/ti6/mitarbeiter/pst/Sim/Simulator.html)).

Um dos requisitos básicos para nosso ambiente de simulação é que todas as bibliotecas de programação sejam software livre e em linguagem C/C++. As bibliotecas utilizadas no desenvolvimento do sistema são: (i) ***Open Dynamics Engine***: ([www.ode.org](http://www.ode.org)) é uma biblioteca desenvolvida para a simulação física de corpos rígidos articulados [Smith 2006]. É utilizada para o desenvolvimento dos robôs e do mundo colisivo. Uma estrutura articulada é criada quando corpos rígidos são conectados por algum tipo de articulação, como, por exemplo, um veículo terrestre que tem a conexão de rodas em um chassi. A ODE não tem como objetivos realizar simulação de outras dinâmicas além da dinâmica de corpos rígidos (e.g. ondas, fluídos, corpos flexíveis, fraturas). O sistema de detecção de colisão é nativo e suporta diversas primitivas (e.g. esfera, caixa, cilindro, plano, raio). A utilização da ODE no nosso ambiente é fundamental por fornecer restrições físicas, principalmente na definição da morfologia dos robôs; (ii) ***Open Scene Graph***: ([www.openscenegraph.org](http://www.openscenegraph.org)) é uma biblioteca para desenvolvimento de aplicações gráficas 3D de alta performance. Baseada no conceito de grafos de cena, provê ao desenvolvedor um ambiente orientado a objeto sobre a *OpenGL* ([www.opengl.org](http://www.opengl.org)), liberando este da necessidade de implementação e otimização de chamadas gráficas de baixo nível. Um grafo de cena permite a representação de objetos em uma cena com uma estrutura que permite a criação de grupos que podem compartilhar propriedades, assim, podemos definir uma propriedade comum em um nível hierárquico mais alto e todos os objetos inferiores receberão esta propriedade [Barros et al. 2007]; (iii) ***DrawStuff***: como a ODE é completamente independente de visualizador, iniciar a criação dos corpos e das simulações pode ser uma tarefa bastante árdua caso não tenhamos uma forma simples e fácil de visualizar os objetos. Por este motivo, a biblioteca *DrawStuff* é disponibilizada em conjunto com a ODE. Basicamente, o *DrawStuff* é um ambiente de visualização de objetos 3D que tem o propósito de permitir a demonstração visual da ODE sendo uma biblioteca bastante simples e rápida para utilização; (iv) ***Demeter***: ([www.tbgssoftware.com](http://www.tbgssoftware.com)) é uma biblioteca desenvolvida para renderizar terrenos 3D, desenvolvida para ter rápida performance e boa qualidade visual, pode renderizar grandes terrenos em tempo-real sem necessidade de hardware especial, depende da *Simple DirectMedia Layer* ([www.libsdl.org](http://www.libsdl.org)) para realizar o tratamento das texturas do terreno e da *Geospatial Data Abstraction Library* ([www.gdal.org](http://www.gdal.org)) para carregar arquivos de elevação.

#### 4. Técnicas Reais de Identificação e Combate de Incêndios Florestais

A fim de melhor entender como proceder no combate a incêndios florestais, e assim planejar as estratégias a serem implementadas nos agentes autônomos, foi realizado um estudo sobre as técnicas reais de operação. Este estudo teve como base os trabalhos de [Antunes 2000, Batista 2004, CPTEC/INPE 2006, LIF 2006, Remel and Pereira 2001]. A operação de combate ou supressão de um incêndio envolve seis etapas distintas [LIF 2006]: (i) *Deteção*: tempo decorrido entre a ignição ou início do fogo e o momento que ele é visto por alguém, alguns métodos são o uso das torres de vigilância, patrulhamento terrestre, patrulhamento por avião ou imagens de satélites; (ii) *Comunicação*: tempo compreendido entre a deteção do fogo e o recebimento da informação por um responsável; (iii) *Mobilização*: tempo gasto entre o recebimento da informação da existência do fogo e a saída do pessoal para combate; (iv) *Deslocamento*: tempo compreendido entre a saída do pessoal de combate e a chegada da primeira turma ao local do incêndio; (v) *Planejamento*: tempo gasto pelo responsável pelo combate (QG) para avaliar o comportamento do fogo e planejar a estratégia de combate; e (vi) *Combate*: tempo consumido na operação de combate ou eliminação do incêndio. Existem quatro métodos de combate ao fogo nos incêndios florestais [LIF 2006]: (i) *Método direto*: usado quando a intensidade do fogo permite uma aproximação suficiente da brigada à linha de fogo, são usadas as seguintes técnicas e materiais: água (bombas costais, baldes ou moto-bombas); terra (pás); ou batidas (abafadores); (ii) *Método paralelo ou intermediário*: usado quando não é possível o método direto e a intensidade do fogo não é muito grande, consiste em limpar, com ferramentas manuais, uma estreita faixa, próxima ao fogo, para deter o seu avanço e possibilitar o ataque direto; (iii) *Método indireto*: usado em incêndios de intensidade muito grande, consiste em abrir aceiros com equipamento pesado (*e.g.* trator, motoniveladeira), utilizando ainda um contra-fogo, para ampliar a faixa limpa e deter o fogo, antes que chegue ao aceiro; e (iv) *Método aéreo*: usado nos incêndios de copa, de grande intensidade e área e em locais de difícil acesso às brigadas de incêndio, são usados aviões e helicópteros, especialmente construídos ou adaptados para o combate ao incêndio.

A rapidez e a eficiência na deteção e monitoramento dos incêndios florestais são fundamentais para a viabilização do controle do fogo, redução dos custos nas operações de combate e atenuação dos danos. Para países de grande extensão territorial, como o Brasil, o monitoramento dos incêndios florestais através de imagens de satélites é o meio mais eficiente e de baixo custo quando comparado com os demais meios de deteção [Batista 2004]. O lançamento em 1972 do primeiro satélite *Landsat* possibilitou detectar alterações nas áreas florestais do espaço. Desde então, as imagens termais e de infravermelho têm sido usadas na deteção de incêndios e estudos de mapeamento, permitindo que áreas queimadas e não queimadas sejam detectadas através do contraste entre os gradientes térmicos [Remel e Pereira 2001].

#### 5. Ambiente de Simulação

O protótipo do sistema foi implementado em C++, a biblioteca OSG é responsável pela saída gráfica do protótipo, a biblioteca *Demeter* é responsável pelo terreno irregular e a biblioteca ODE é responsável pelo realismo físico, tanto da morfologia robótica como da colisão entre os objetos presentes no ambiente (*e.g.* robôs, árvores, inclinação de terreno). A base do realismo de interação é o uso integrado das bibliotecas de

programação ODE, OSG e *Demeter*. Este conjunto permite que os robôs simulados fisicamente respeitem questões como gravidade, inércia e atrito. Por exemplo, mantendo uma força  $f$  constante nos motores lineares (torque) um veículo terá velocidade  $v$  em regiões planas, em regiões de declive terá  $v$  maior e em aclives terá  $v$  menor.

A implementação do protótipo (Figura 1) iniciou com a criação de um mapa que simula a integração das informações de vegetação, topografia e comportamento de fogo baseado em [Antunes 2000, Batista 2004, CE 2006, CPTEC/INPE 2006, Koproski 2005, LIF 2006, Rimmel e Perera 2001]. O estudo dos modelos de florestas e resíduos florestais é de grande importância para o aprimoramento dos modelos de simulação a serem implementados em ambientes virtuais [Pessin et al. 2007]. A criação dos mapas teve como base cartas topográficas e o mapa de modelos de combustíveis florestais do Ministério da Agricultura do Brasil.



**Figura 1. Ambiente completo (a) Um veículo preso em uma árvore e (b) Vista do grupo em deslocamento até o incêndio.**

Para a simulação da vegetação e correta propagação do incêndio, existe uma matriz oculta sob o terreno. Esta matriz possui, para cada área do terreno, o tipo de vegetação presente, assim, considerando orientação do vento, intensidade do vento e tipo de vegetação de uma área podemos construir a simulação de propagação do fogo. O fogo pode ser iniciado em uma posição aleatória ou parametrizado em uma posição inicial fixa. A velocidade de propagação respeita dados do modelo retirados de [Koproski 2005], considerando intensidade do vento e sua orientação. Quanto ao vento, tanto a sua intensidade como a sua orientação podem ser geradas aleatoriamente ou configurados a partir de dados parametrizados pelo usuário. O tempo de permanência do fogo em uma área é relacionado diretamente ao tipo da vegetação presente e se comporta baseado nos valores de tipo de vegetação, inclinação do terreno, intensidade e orientação do vento. Desta forma a propagação do fogo busca simular de modo bastante realístico a forma como o fogo se propagaria em um ambiente real. A simulação da comunicação é feita utilizando um sistema baseado em Quadro-Negro (*blackboard*) [Rezende 2003]. O sistema de comunicação simula a troca de mensagens que vão do agente monitor para o agente líder, do agente líder aos agentes de combate, e dos agentes de combate ao agente líder. Existem casos de comunicação um para um e de um para todos. A fila usada como função de Quadro-Negro armazena as seguintes informações: indicador de remetente, indicador de destinatário, e tipo da mensagem (*e.g.* aviso de incêndio, aviso de fim de incêndio, negociação de times, posição do incêndio). No ambiente desenvolvido, cada árvore existe como um modelo OSG e como um cilindro ODE, assim, o veículo da Figura 1(a) está, na verdade, colidindo com um

cilindro (não visualizado). O ambiente permite que, através de parâmetros, possamos habilitar ou não a exibição dos objetos físicos ao invés de apenas a sua representação gráfica, neste exemplo, uma árvore.

### 5.1. Operação de Identificação e Combate de Incêndio

O ambiente conta com um grupo de  $n$  robôs de comportamento reativo (controlados por uma RNA explicada na próxima Seção) e com um agente deliberativo (mecanismo de planejamento). Em se considerando arquiteturas de sistemas multi-agente, o ambiente desenvolvido possui controle centralizado de planejamento e controle distribuído de ações (local em cada robô móvel). Usamos o ambiente para simular a seguinte operação: um agente monitor (satélite) monitora o terreno da área florestal, ao identificar uma área com foco de incêndio envia uma mensagem para o agente líder. Esta mensagem contém a posição  $(x,y)$  do incêndio (simulando uma posição UTM) e a densidade da vegetação na área. O agente líder é o agente responsável pela definição das posições de atuação dos robôs bombeiros no combate ao incêndio. Após receber o *aviso de incêndio* do agente monitor, o agente líder envia para todos os agentes de combate uma mensagem informando *início de incêndio na posição  $(x,y)$*  e recebe a distância vetorial  $d$  (Equação 1) de cada agente de combate ao incêndio.

$$d(P,Q) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

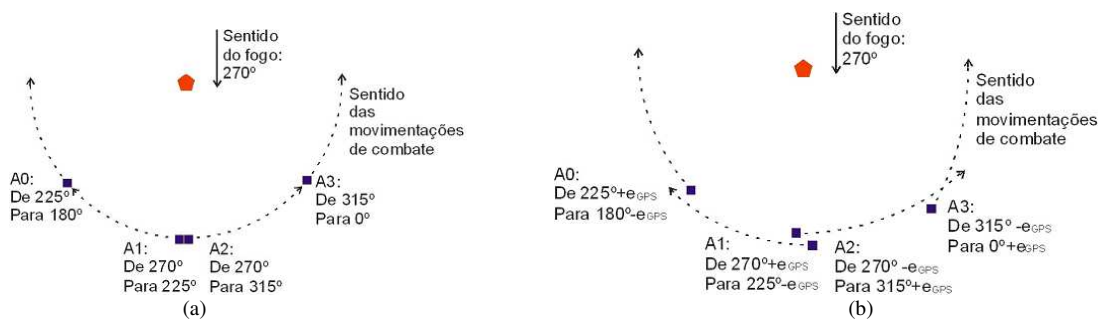
Após o agente líder receber as respostas dos agentes de combate, envia mensagens de solicitação de formação para atuação da seguinte forma: se não existe vento, solicita os 8 agentes mais próximos ao incêndio em formação circular equidistante com um raio predeterminado; se existe vento, solicita os 4 agentes mais próximos ao incêndio em formação semi-circular (ferradura) no sentido contrário ao do vento, com raio definido de acordo com a intensidade do vento. Esta formação é baseada em regras e pode ser visualizada nas Figuras 2 e 3. A regra pré-programada que define a posição final de cada robô na composição da formação da equipe (quando circular equidistante) pode ser vista nas Equações 2 e 3.

$$x_f = x_a + r \times \cos\left(i \times \frac{360}{q} \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (2)$$

$$y_f = y_a + r \times \sin\left(i \times \frac{360}{q} \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (3)$$

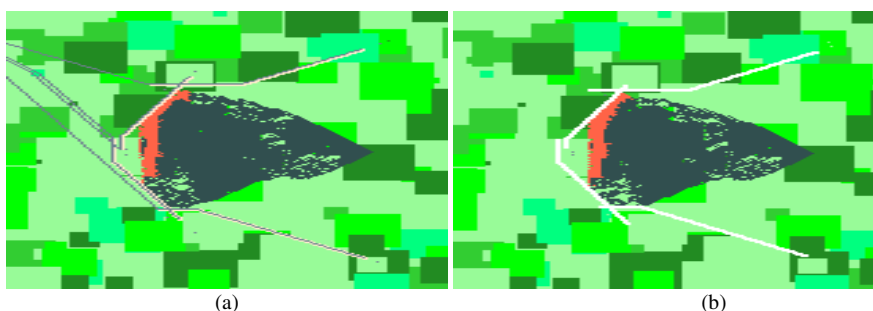
Considere  $x_f$  e  $y_f$  como as coordenadas da posição final do agente,  $x_a$  e  $y_a$  como as coordenadas da posição central do incêndio,  $r$  como o raio de atuação,  $q$  a quantidade total de agentes e  $i$  o índice do agente. As posições são negociadas e confirmadas com a comunicação entre os agentes da equipe. Os agentes do time possuem quatro sensores de temperatura que servem como alerta, quando a temperatura de um deles excede o máximo especificado, o agente se desloca no sentido do sensor com a menor temperatura e solicita ao agente líder a atualização da formação do time. O comportamento dos agentes de combate é reativo, deslocando-se em direção a posição de seu objetivo específico desviando de obstáculos. O método de combate de incêndio simulado é o método indireto. Os agentes de combate simulados são motoniveladoras que tem como finalidade cercar o foco de incêndio e criar um aceiro (área livre de

vegetação onde o fogo se extingue pela falta de combustível). Esta operação pode ser entendida com as Figuras 2 e 3. Quanto ao controle de posicionamento, um sensor do tipo GPS é simulado em cada robô. Em experimentos que realizamos com um GPS *Garmin Etrex* ([www.garmin.com](http://www.garmin.com)) obtivemos um erro médio de 18,6 metros. Considerando que cada agente possui seu próprio GPS o tratamento deste erro é crucial na criação dos aceiros. Tratamos esta informação de duas maneiras, a primeira faz com que o erro médio deste sensor durante o deslocamento seja usado somado a distância de criação do aceiro e também é somado ao final da área de criação, como mostra a Figura 2(b).



**Figura 2. Exemplo de formação de combate quando o sentido do vento é de 270° e existem 4 agentes de combate: (a) Não considera erro no GPS e (b) Considerando erro no GPS, apresentando limites propositalmente redundantes**

A Figura 2(a) apresenta as posições e trajetórias com “posicionamento perfeito”, o que não é possível de se obter em uma situação real. Devido ao erro de posicionamento do GPS não é possível se estabelecer uma rota que se encaixe perfeitamente como a apresentada nesta Figura. Deste modo a preparação do aceiro (semi-círculo indicado na figura) não será executada de forma correta. A Figura 2(b) apresenta as correções adicionadas ao algoritmo de modo a obter uma trajetória que permita criar um aceiro incluindo o erro do GPS ( $e_{GPS}$ ) no modelo de deslocamento dos agentes. As Figuras 3(a) e 3(b) demonstram os resultados obtidos em uma das simulações realizadas com o protótipo 2D.



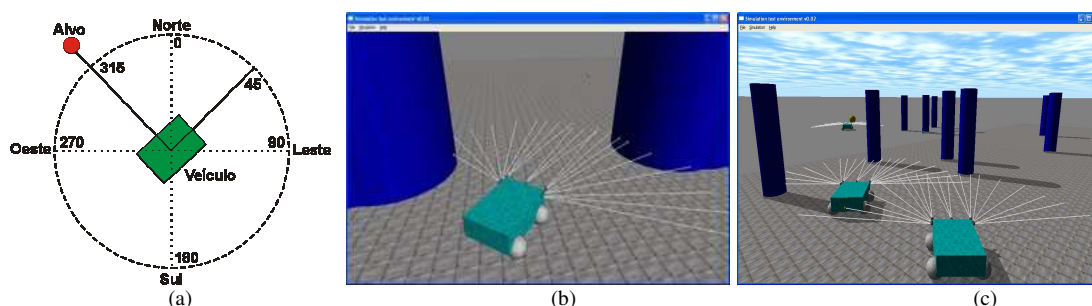
**Figura 3. Simulação 2D considerando o erro de GPS: (a) Trajetórias dos robôs-bombeiros e (b) Criação do aceiro. Ambas apresentam limites propositalmente redundantes**

## 5.2. Morfologia dos Robôs Móveis

Os robôs móveis foram desenvolvidos com a biblioteca de simulação de corpos rígidos articulados ODE. A Figura 4(b) apresenta o veículo desenvolvido. Dada a existência de



restrições físicas, a única maneira de controlar o veículo das Figuras 4(b) e 4(c) é com a aplicação de forças em seus dois motores simulados, que são: um motor angular (para o giro do volante) e um motor linear (para o torque). Além do GPS e termômetro descritos na Seção anterior, cada robô possui também uma bússola (Figura 4(a)), responsável pela obtenção da orientação do veículo e, em conjunto com o GPS, é responsável pela obtenção do azimute (orientação em que deve se deslocar para atingir o alvo). Os sensores de distância são sonares simulados, apresentando as características de capacidade de medir distâncias entre 15cm e 11m, como o Polaroid 6500 ([www.senscomp.com](http://www.senscomp.com)). Nas Figuras 4(b) e 4(c), cada três linhas brancas representam um sensor.



**Figura 4. Sensores desenvolvidos: (a) A bússola é responsável pela orientação, e, junto com o GPS, permite obter o azimute para o alvo, (b) e (c) Sensores de distância.**

### 5.3. Rede Neural Artificial

Quando um robô recebe a coordenada da posição do incêndio do agente líder, ele deve se deslocar de sua posição atual (aleatória) até a posição de atuação. Para realizar esta navegação, desviando de obstáculos, o agente usa uma Rede Neural Artificial (RNA) do tipo *backpropagation*. As entradas da RNA são obtidas pelos sensores presentes no robô e as saídas são as forças a serem aplicadas nos atuadores. A RNA possui 9 entradas: orientação do veículo e orientação para o alvo (obtidos através de bússola e GPS simulados) mais as proximidades de obstáculos medidas por 7 sensores simulados do tipo sonar. As saídas são: força a aplicar no motor linear (torque, de 0.0 a 3.0) e força a aplicar no motor angular (giro da barra da direção, de -0.8 a 0.8). A base de dados para treinamento da RNA foi obtida a partir de um sistema de regras simples, rodamos 15 simulações com diferentes pontos de início e destino para obter dados específicos de navegação e 12 simulações para obter dados de desvios de obstáculos, obtendo um total de 7.720 registros. Esta base de dados foi dividida em 70% para treino e 30% para teste, e, usando o SNNS ([www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/](http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/)) foram geradas seis Redes Neurais Artificiais com 4, 9, 18, 24, 30 e 36 neurônios na camada oculta. Foi realizado o treino de cada RNA e análise de 500, 1.000, 1.500 e 2.000 ciclos. A Tabela 1 apresenta os dados de treino e teste das Redes Neurais desenvolvidas, os valores apresentados são o Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error* - MAE) (Equação 4).

$$|E_{MAE}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}_i| \quad (4)$$

**Tabela 1. Erro Médio Absoluto das RNAs.**

RNA	Ciclos	Exp. 1				Exp. 2				Exp. 3			
		Treino		Teste		Treino		Teste		Treino		Teste	
		Giro	Veloc.	Giro	Veloc.	Giro	Veloc.	Giro	Veloc.	Giro	Veloc.	Giro	Veloc.
9x4x1	500	0,228	0,479	0,223	0,478	0,220	0,450	0,222	0,445	0,230	0,472	0,227	0,472
9x4x1	1000	0,170	0,478	0,174	0,477	0,158	0,401	0,161	0,404	0,153	0,437	0,157	0,438
9x4x1	1500	0,136	0,424	0,139	0,424	0,150	0,388	0,153	0,390	0,142	0,411	0,147	0,412
9x4x1	2000	0,138	0,412	0,143	0,412	0,149	0,386	0,152	0,389	0,143	0,408	0,149	0,409
9x9x1	500	0,235	0,465	0,229	0,462	0,135	0,454	0,139	0,453	0,141	0,426	0,146	0,428
9x9x1	1000	0,144	0,413	0,145	0,413	0,131	0,406	0,135	0,408	0,128	0,376	0,134	0,379
9x9x1	1500	0,131	0,402	0,136	0,401	0,130	0,395	0,135	0,398	0,125	0,361	0,131	0,366
9x9x1	2000	0,128	0,397	0,134	0,396	0,129	0,391	0,133	0,394	0,125	0,349	0,132	0,354
9x18x1	500	0,231	0,468	0,223	0,463	0,290	0,476	0,275	0,473	0,183	0,475	0,186	0,471
9x18x1	1000	0,133	0,403	0,138	0,405	0,131	0,408	0,136	0,409	0,137	0,416	0,141	0,417
9x18x1	1500	0,134	0,396	0,139	0,399	0,125	0,344	0,130	0,346	0,134	0,392	0,139	0,396
9x18x1	2000	0,137	0,391	0,142	0,393	0,112	0,311	0,117	0,316	0,135	0,382	0,141	0,387
9x24x1	500	0,190	0,412	0,191	0,410	0,209	0,474	0,203	0,473	0,172	0,446	0,171	0,444
9x24x1	1000	0,142	0,314	0,135	0,318	0,177	0,392	0,176	0,392	0,130	0,340	0,133	0,341
9x24x1	1500	0,127	0,285	0,128	0,292	0,140	0,220	0,140	0,229	0,132	0,289	0,136	0,294
9x24x1	2000	0,096	0,261	0,100	0,269	0,130	0,205	0,132	0,215	<b>0,112</b>	<b>0,183</b>	<b>0,116</b>	<b>0,194</b>
9x30x1	500	0,145	0,383	0,150	0,384	0,159	0,382	0,157	0,383	0,188	0,309	0,187	0,317
9x30x1	1000	0,135	0,355	0,139	0,358	0,142	0,340	0,145	0,346	0,127	0,294	0,131	0,301
9x30x1	1500	0,124	0,338	0,128	0,341	0,130	0,317	0,135	0,325	0,122	0,288	0,126	0,296
9x30x1	2000	0,116	0,319	0,121	0,323	0,126	0,304	0,132	0,311	0,115	0,283	0,119	0,291
9x36x1	500	0,142	0,452	0,144	0,445	0,229	0,471	0,221	0,464	0,246	0,470	0,232	0,462
9x36x1	1000	0,139	0,400	0,142	0,401	0,136	0,402	0,138	0,401	0,172	0,452	0,147	0,446
9x36x1	1500	0,137	0,374	0,140	0,374	0,123	0,373	0,126	0,374	0,141	0,397	0,143	0,396
9x36x1	2000	0,133	0,360	0,136	0,359	0,114	0,342	0,118	0,346	0,137	0,384	0,141	0,385

A RNA que apresentou o menor MAE tanto no giro como na velocidade foi a com 24 neurônios na camada oculta, com 2.000 ciclos de treino da terceira semente aleatória. Esta RNA foi convertida em um programa C e utilizada nos robôs.

#### 5.4. Aplicação da Rede Neural Artificial

Após a implementação da RNA no controle de navegação com desvio de obstáculos nos robôs móveis, realizamos uma série de simulações com o ambiente contendo 3 robôs, com pontos de início e destino aleatórios e com uma quantidade parametrizada de cilindros. Os resultados podem ser visto nas Tabelas 2 e 3. Para tornar as simulações mais rápidas, trabalhamos em um terreno pequeno, representado 80m x 100m, cada veículo tem dimensões de 2,5m x 3m e cada cilindro tem diâmetro de 1m. A Figura 5 apresenta imagens de seqüências de uma simulação onde podemos ver o resultado correto de navegação com desvio e o posicionamento final dos robôs.

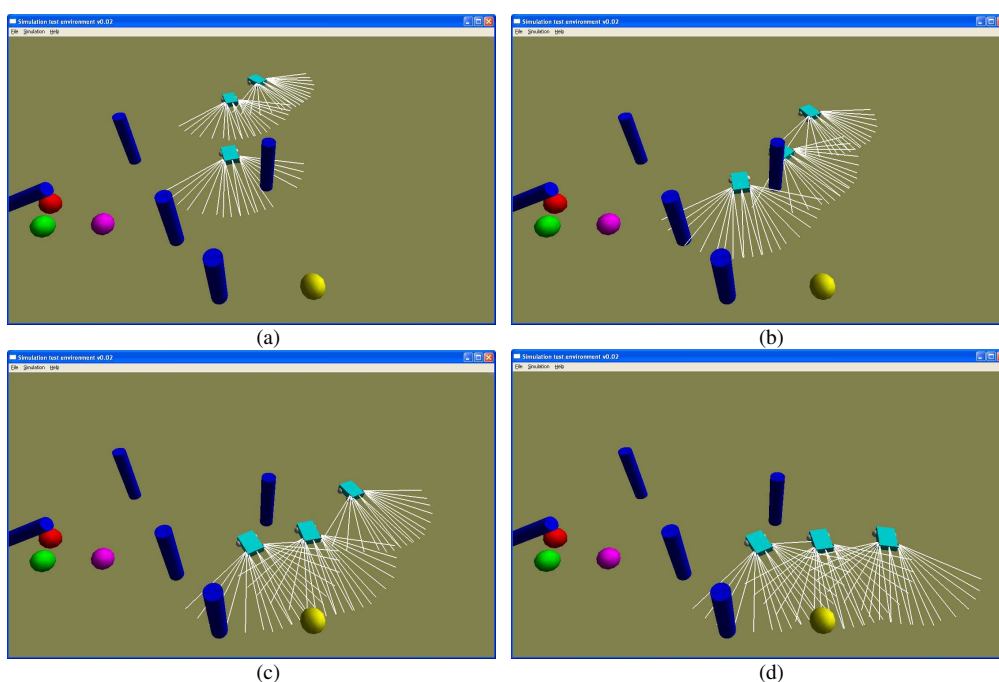
**Tabela 2. Resultado das simulações com 10 cilindros.**

Simulação	Quantidade de cilindros	Quantidade de chegadas satisfatórias	Quantidade de colisões	Quantidade de trajetos errados
1	10	3	0	0
2	10	3	0	0
3	10	2	0	1
4	10	3	0	0
5	10	3	0	0
6	10	3	0	0

**Tabela 3. Resultado das simulações com 20 cilindros.**

Simulação	Quantidade de cilindros	Quantidade de chegadas satisfatórias	Quantidade de colisões	Quantidade de trajetos errados
7	20	2	0	1
8	20	3	0	0
9	20	2	0	1
10	20	3	0	0
11	20	1	1	1
12	20	2	1	0

Nas duas colisões observadas, apenas o sensor frontal identificava o cilindro, e o veículo seguia em frente com velocidade reduzida. Esse tipo de desvio existia na base de treino, que devia priorizar giro para direita, porém, por ter produzido alguns erros na simulação, encoraja a construção de uma base de treino maior.



**Figura 5. Seqüências de uma simulação com navegação e desvio satisfatórios.**

## 6. Conclusão

O objetivo deste trabalho foi detalhar o projeto e o desenvolvimento de um sistema multi-agente que opera em um ambiente virtual de simulação realística. Onde uma equipe heterogênea de agentes autônomos trabalha cooperativamente a fim de realizar com sucesso a identificação e o combate de incêndios em áreas florestais, sem intervenção humana. A abordagem implementada adota estratégia centralizada, mas com controle de ação distribuído, onde cada agente possui autonomia na execução das tarefas que lhe são passadas. Os robôs de combate são fisicamente simulados com a biblioteca ODE e as informações sensoriais de cada robô (*e.g.* GPS, bússola, sonar) servem de entrada para uma Rede Neural que controla os atuadores do veículo para assim realizar navegação com desvio de obstáculos de um ponto aleatório até um ponto de atuação no combate ao incêndio. O ambiente desenvolvido apresenta simulação de propagação de fogo baseado em tipos de vegetação, orientação e intensidade do vento. A comunicação através do uso de *blackboard* se mostrou bastante prática e simples de

implementar. Os resultados das simulações demonstram que a Rede Neural controla satisfatoriamente os robôs móveis e que o sistema proposto pode vir a ter um papel muito importante no planejamento e execução de operações reais de combate a incêndios florestais e possivelmente em outras tarefas similares, como acidentes nucleares ou desastres ambientais.

## Referências

- Antunes, M. A. H. (2000) “Uso de satélites para detecção de queimadas e para avaliação do risco de fogo”. *Ação Ambiental*, 12:24-27.
- Barros, L. M., Gonzaga, L., Raposo, A. B. (2007) “Open Scene Graph: conceitos básicos e aplicações em realidade virtual”, Tutorial on IX Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR).
- Batista, A. C. (2004) “Detecção de incêndios florestais por satélite”, *Revista Floresta* 34, Mai/Ago, 237-241, Curitiba, Paraná.
- Bekey, G. A. (2005) “Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control”. Cambridge, USA: The MIT Press, 2005. 577 p.
- CE - Comissão Europeia (2006) “O que faz a Europa? Incêndios florestais”. <http://ec.europa.eu/research/leaflets/disasters/pt/forest.html>, setembro.
- CPTEC/INPE (2006) “Centro de previsão do tempo e estudos climáticos - Instituto nacional de pesquisas espaciais”, [www.cptec.inpe.br/queimadas](http://www.cptec.inpe.br/queimadas), outubro.
- Dudek, G., Jenkin, M. (2000) “Computational Principles of Mobile Robotics” Cambridge, London, UK: The MIT Press, 280 p.
- Go, J., Browning, B., Veloso, M. (2004) “Accurate and flexible simulation for dynamic, vision-centric robots”. International Joint Conference on Autonomous Agents.
- JPL/NASA (2007) “Jet Propulsion Laboratory/NASA” [www.robotics.jpl.nasa.gov](http://www.robotics.jpl.nasa.gov), maio.
- Koproski, L.P. (2005) “O fogo e seus efeitos sobre a herpeto e a mastofauna terrestre no parque nacional de Ilha Grande”, Dissertação de mestrado, UFPR.
- LIF - Laboratório de Incêndios Florestais (2006) “Pesquisas e projetos em prevenção e combate de incêndios florestais”, UFPR, [www.floresta.ufpr.br/~firelab](http://www.floresta.ufpr.br/~firelab), setembro.
- Marchi, J. (2001) “Navegação de robôs móveis autônomos: estudo e implementação de abordagens”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Osagie, P. (2006) “Distributed Control for Networked Autonomous Vehicles”. Dissertação de Mestrado, KTH CSC, Royal Institute of Technology, Sweden.
- Osório, F. S., Musse, S. R., Vieira, R., Heinen, M. R., Paiva, D. C. (2006) Increasing Reality in Virtual Reality Applications through Physical and Behavioural Simulation In: Proceedings of the Virtual Concept Conference. Springer Verlag, v.2, p. 1-45.
- Pessin, G., et al. (2007) “Simulação Virtual de Agentes Autônomos para a Identificação e Controle de Incêndios em Reservas Naturais”, IX Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR), v.1, p. 236-245.
- Pfeifer, R., Scheier, C. (1999) “Understanding Intelligence”. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press.
- Rommel, T. K., Perera, A. H. (2001) “Fire mapping in a northern boreal forest: assessing AVHRR/NDVI methods of change detection”, *Forest Ecology and Management* 152:119-129.
- Rezende, S.O. (2003) “Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações”, Ed. Manole, São Paulo.
- Smith, R. (2006) “Open Dynamics Engine v0.5 User Guide”.