

Utilizando Agentes Autônomos com Aprendizado para a Identificação e Combate de Incêndios em Áreas Florestais

Gustavo Pessin¹, Fernando Osório¹, Soraia Musse², Vinícius Nonnemacher³,
Sandro Souza Ferreira³

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

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

³GT 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 realística¹. Neste sistema, 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. Cada tipo de agente possui um conjunto próprio de operações e o planejamento de suas ações envolve a comunicação com o demais agentes e os dados de seus sensores (e.g. GPS, odômetro, sensor de temperatura). Utilizamos uma Rede Neural Artificial no controle de movimentação (percepção-ação) dos agentes de combate devido a sua movimentação ocorrer em um terreno desconhecido que simula aspectos naturais como tipos de vegetação e topografia. Os primeiros resultados demonstraram que simulações realísticas utilizando agentes robóticos colaborativos com aprendizado podem vir a ter um papel muito importante no planejamento e execução de operações reais de combate a incêndios em áreas 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 visualização, 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, Browning and Veloso, 2004]. Dotar robôs autônomos de capacidade de raciocínio inteligente e de interação com o meio em que estão inseridos é

¹ O código-fonte e os vídeos desenvolvidos neste trabalho podem ser obtidos em <http://pessin.googlepages.com/robombeiros>.

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 eficiente para a realização de uma tarefa, assim, a utilização de um único agente definitivamente não é a melhor solução. 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 colocam 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.

Neste trabalho, um grupo de agentes autônomos trabalha cooperativamente a fim de realizar com sucesso a identificação e o combate de incêndios em áreas florestais, sem intervenção humana. Simulados diferentes tipos de agentes, com níveis hierárquicos diferentes, assim, cada etapa do processo conta com agentes específicos que possuem um conjunto de ações determinadas. Dados de sensores entram no controle dos agentes de combate, sendo que todos os sensores simulados retornam valores estocásticos (com ruído), tornando assim o modelo mais realista. Inicialmente trabalhamos com um terreno desconhecido, o que nos permite maior generalização no modelo. A escolha do trajeto que um robô bombeiro deve fazer até o foco do incêndio é

em tempo real e usando uma Rede Neural Artificial. 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. Como resultado principal esperamos projetar melhores agentes autônomos de combate a incêndios, com sensores e métodos de comunicação eficientes para a execução satisfatória da tarefa proposta neste artigo, bem como propor métodos de deslocamento e regras de formação de equipes. O sucesso desta tarefa envolve o uso de uma variedade de tecnologias de diferentes campos, assim, a construção deste sistema é um bom estudo para avaliar eficiência de arquitetura multi-agente, estratégia cooperativa, fusão de sensores e modelagem robótica. A tarefa em si poderá ser generalizada para outras atividades práticas como acidentes nucleares ou desastres ambientais. Com técnicas de aprendizado de máquina esperamos obter agentes que suportem melhor um ambiente dinâmico, fazendo assim o sistema mais flexível e autônomo possível.

Neste artigo apresentamos na Seção 2 uma pequena conceituação teórica de agentes, características e propriedades. Na Seção 3 detalhamos dados ambientais e tipos de combustíveis, informações importantes para que seja feita uma adequada simulação do ambiente e dos incêndios florestais. Na seção 4 detalhamos as técnicas e ferramentas reais de combate a incêndios florestais, visando a criação de nossa brigada virtual autônoma de combate a incêndios. Na Seção 5 detalhamos o desenvolvimento de nosso ambiente, as bibliotecas de programação utilizadas, os protótipos implementados, a Rede Neural Artificial desenvolvida e os resultados das simulações. Finalizamos apresentando possíveis trabalhos futuros e conclusões sobre os trabalhos realizados.

2. Sistemas Multi-agentes

Embora não exista uma definição consensual do conceito de agente, existe a noção de que a autonomia é essencial num agente [Reis 2003]. Um agente é um sistema computacional que se encontra situado em um dado ambiente. Este ambiente pode ser situado no mundo real, um ambiente simulado ou um computador. Os agentes mais comuns são os agentes de software, e no caso do sistema proposto, teremos um agente virtual (simulado) inserido em um ambiente virtual. Agentes podem ter uma existência física (real ou virtual), designando-se nesse caso por agentes robóticos. Independentemente do tipo de agente e de ambiente é essencial a capacidade do mesmo perceber o ambiente no qual está inserido e agir nele de maneira autônoma. Desta forma, o agente deve possuir sensores e atuadores apropriados ao seu ambiente e à execução das tarefas para as quais foi projetado [Fonseca 2001]. O ambiente é onde um agente ou um conjunto de agentes estão inseridos. Pode ser físico, como ambientes onde estão inseridos robôs, ambientes de software ou ambientes de realidade virtual, onde se faz a simulação do agente inserido em um ambiente físico simulado de maneira realística [Rezende 2003, Osório et al. 2006]. A Figura 1 apresenta um esquema típico

de percepção-ação de um agente e a representação do ambiente. No caso do sistema proposto, o agente tem a capacidade de perceber informações sobre o ambiente em que está inserido, mas também possui a capacidade de agir sobre este ambiente.

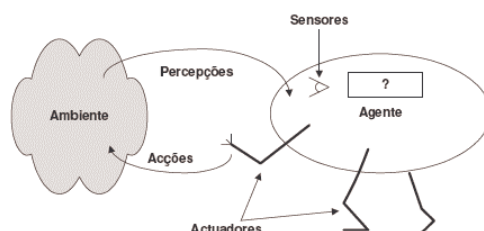


Figura 1. Exemplo de interação de agente com ambiente [Reis 2003].

A comunicação permite que os agentes em um ambiente multi-agente troquem informações que servem de base para coordenar suas ações e realizar cooperação. A comunicação entre agentes é a troca intencional de informações causada pela produção e percepção de sinais por parte dos agentes [Siebra 2000]. Depois de projetados os agentes com capacidade de comunicação, precisamos escolher qual a arquitetura mais adequada para promover a sua colaboração, que podem ser [Rezende 2003, Fonseca 2001, Genesereth and Ketchpel 1994]: (i) *Sistemas Horizontais*: onde todos os agentes possuem competências idênticas, a inexistência de quaisquer agentes especiais, que possam influenciar ou limitar as interações entre os demais agentes, permite que a comunicação ocorra sem qualquer controle especializado; (ii) *Sistemas Quadro-Negro*: onde o princípio básico é a criação de uma estrutura de dados comum através da qual os diversos agentes se comunicam, em sistemas baseados em Quadro-Negro não se verifica qualquer tipo de comunicação diretamente entre agentes, sendo esta efetuada sempre através da estrutura de dados comum; ou (iii) *Sistemas Federados*: onde são introduzidos agentes facilitadores que coordenam a troca de mensagens. Na nossa implementação, toda a comunicação entre os agentes se dá pelo uso de um Quadro-Negro (*blackboard*).

3. Dados Ambientais

Existem modelos matemáticos bastante complexos para se estimar a velocidade de propagação de um incêndio. No nosso modelo obtivemos de [Koproski 2005] medições reais de velocidade de propagação de incêndio relacionadas com velocidade do vento e tipo de vegetação em parques nacionais. Por exemplo, em vegetação arbustiva com velocidade do vento de 20km/h a velocidade de propagação do fogo medida foi de 0,09m/s e, em vegetação herbácea, com velocidade do vento de 60km/h a velocidade de propagação do fogo medida foi de 1,94m/s. Simulados os treze tipos de combustíveis florestais descritos em [MA 2006]. 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, além destes modelos, também é importante que seja feito um mapeamento do terreno e do tipo de vegetação da cobertura deste terreno, caso se deseje realizar uma reprodução mais fiel de um determinado ambiente. A reprodução fiel de ambientes de florestas é de grande importância para tornar o ambiente o mais realista possível.

4. Técnicas Reais de Operação

A fim de melhor entender como proceder no combate a incêndios, e desta forma planejar as estratégias a serem implementadas nos agentes autônomos, foi realizado um estudo sobre as técnicas reais de operação em combate a incêndios de florestas.

A operação de combate ou supressão de um incêndio envolve seis etapas distintas [LIF 2006]: (i) *Detecção*: 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 detecção 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 detecção 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 detecção. [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 detecção de incêndios e estudos de mapeamento, permitindo que áreas queimadas e não queimadas sejam detectadas através do contraste entre os gradientes térmicos [Remel and Pereira 2001].

5. Implementação do Protótipo

O protótipo do sistema foi implementado em C++, a versão com visualização 2D (Figura 2(b)) usa a biblioteca SDL (*Simple DirectMedia Layer*) (<http://www.libsdl.org>), a versão tridimensional (Figura 2(a)) usa a biblioteca OSG (*Open Scene Graph*) (<http://www.openscenegraph.org>) e a biblioteca Demeter (<http://www.tbgssoftware.com>) que permite a leitura de terrenos irregulares [Pessin et al. 2007]. O modelo

bidimensional foi desenvolvido para iniciarmos a implementação de simulações de incêndios (que envolve a propagação do fogo de acordo com tipo de vegetação, sentido e orientação de vento). O modelo tridimensional está sendo desenvolvido a fim de comportar agentes fisicamente simulados, integrando ao OSG e ao Demeter a biblioteca ODE (*Open Dynamics Engine*) (<http://www.ode.org>), assim teremos realismo de simulação física (*e.g.* colisão, atrito), já que a ODE é uma biblioteca de simulação de corpos rígidos articulados.

A implementação do protótipo 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, Remmel and Perera 2001]. A informação cartográfica que motivou a criação dos mapas *2D* e *3D* foi baseada na carta topográfica e no mapa de modelo combustível da Figura 3.

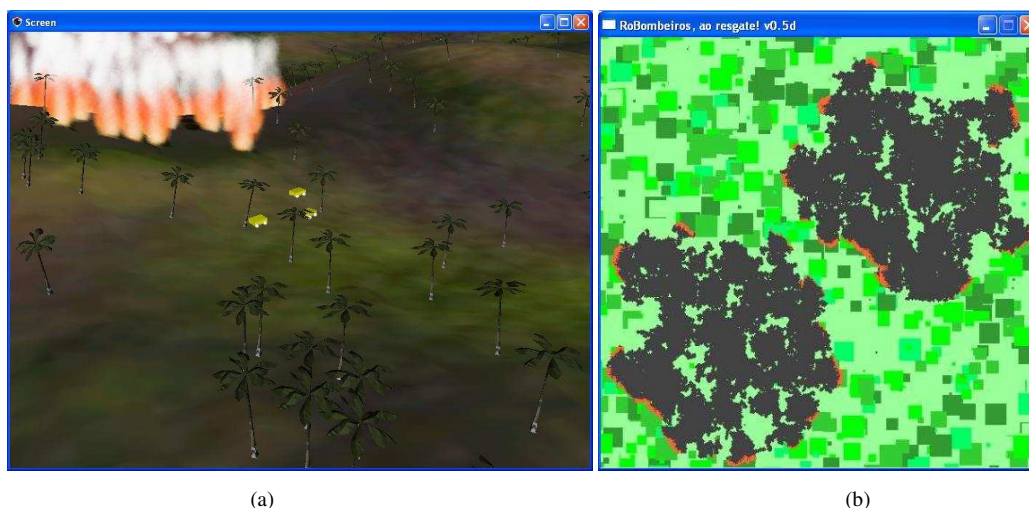


Figura 2. Exemplos dos terrenos gerados (a) OSG+Demeter e (b) SDL.

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 gerados 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.

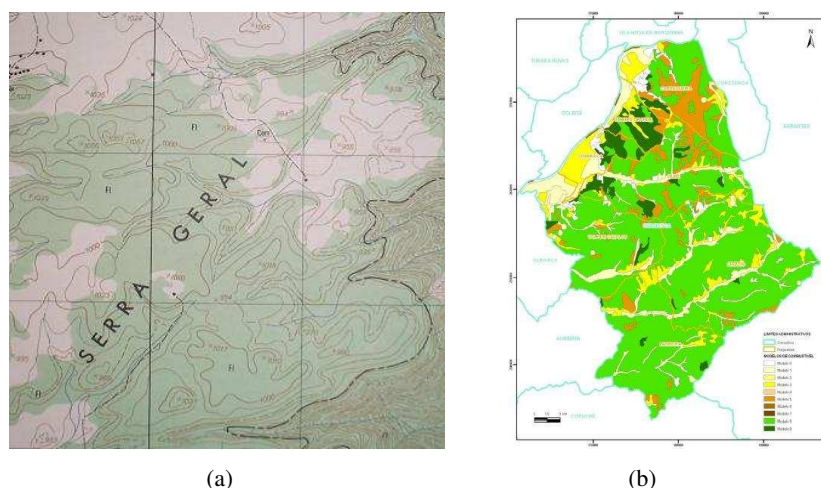


Figura 3. (a) Fragmento de carta topográfica de UTM 0578000, 6764000 até 0584000,6770000 representando um quadrante de 6km x 6km e (b) Mapa de modelos de combustíveis [MA 2006].

Quanto aos agentes simulados, existem 3 tipos: um agente monitor; um agente líder e n agentes de combate, detalhados na Sub-Seção 5.3.

5.1. Comunicação

A simulação da comunicação é feita utilizando um sistema baseado em Quadro-Negro (*blackboard*). 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).

5.2. Rede Neural Artificial

Quando um agente de combate recebe a coordenada de incêndio do agente líder, ele deve se deslocar de sua posição atual (aleatória) até a posição de atuação. Para realizar este deslocamento o agente usa a Equação 1 para calcular o ângulo a no qual deve se deslocar. A cada passo de simulação o agente verifica 6 “caixas de visão” ao redor de sua posição atual e, verificando a densidade de vegetação em cada caixa, escolhe se deslocar no ângulo da caixa de menor densidade de vegetação que melhor respeite o ângulo a calculado previamente, como mostra a Figura 4.

$$a = \arctan\left(\frac{y_f - y_i}{x_f - x_i}\right) \quad (1)$$

A RNA do tipo *backpropagation* desenvolvida permite que o agente simule um método simples de controle (percepção-ação) para que escolha as áreas de menor densidade de vegetação e também desvie de obstáculos. Esta RNA está implementada no modelo 2D, usando a matriz terreno para calcular a densidade das áreas de vegetação. Estamos iniciando este procedimento no modelo 3D, onde os agentes robóticos terão controle motor baseado em dados de sensores do tipo sonar. No modelo 2D a RNA

baseia-se nos valores de pixels da matriz oculta sob o terreno, este mapa 2D possui cores mais escuras e mais claras indicando áreas de maior e menor densidade de vegetação.

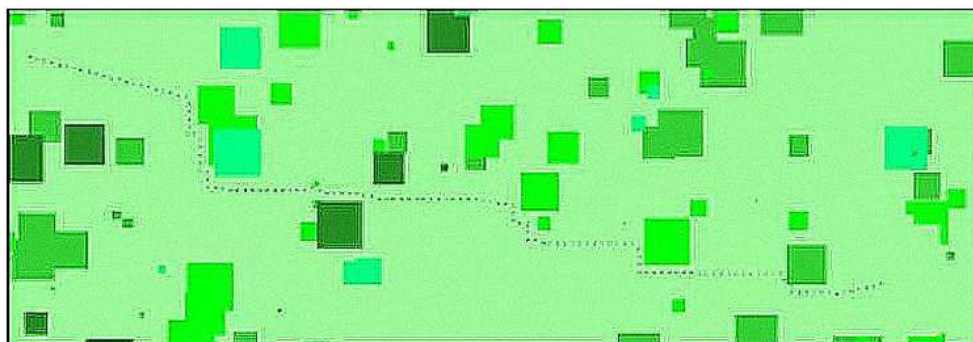


Figura 4. Exemplo de deslocamento de um agente utilizando a RNA para desviar de blocos densos de vegetação.

A Rede Neural sugerida possui 7 neurônios de entrada, que são o ângulo a calculado mais a densidade das 6 caixas de visão. Como saída temos o ângulo sugerido para o deslocamento. A base de treinamento foi criada a partir de um sistema de regras, onde rodamos 7 simulações com diferentes pontos de início e fim e extraímos 870 registros. Esta base de dados foi dividida em 70% para treino e 30% para teste, e, usando o SNNS (<http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/>) foram geradas quatro redes com 14, 21, 24 e 28 neurônios na camada oculta. Foi realizado o treino de cada rede e análise de 3.000 e 4.000 ciclos. Tendo em vista que esta RNA serve para aproximar um ângulo, usamos a média das diferenças entre os ângulos esperados e obtidos (Erro Médio Absoluto) para montar a Tabela 1 e escolher a rede a ser implementada nos agentes.

Tabela 1. Resultado de treino e teste da RNA.

		Erro Médio Absoluto (em graus)							
		Exp. 1		Exp. 2		Exp. 3		Exp. 4	
Rede	Ciclos	Treino	Teste	Treino	Teste	Treino	Teste	Treino	Teste
7x14x1	3.000	4,75	6,45	8,23	9,46	3,85	5,75	8,89	10,41
7x14x1	4.000	5,00	7,60	8,28	9,56	3,44	5,93	8,83	10,55
7x21x1	3.000	3,40	4,50	3,29	4,03	5,96	6,83	4,46	5,93
7x21x1	4.000	3,10	4,01	3,71	4,17	5,20	6,20	4,33	5,48
7x24x1	3.000	2,45	4,70	7,47	9,05	3,40	4,70	3,49	4,50
7x24x1	4.000	2,27	5,10	7,34	8,86	3,25	4,51	3,44	4,32
7x28x1	3.000	3,98	6,49	5,01	6,45	4,58	4,87	3,15	5,22
7x28x1	4.000	3,81	6,52	3,73	5,50	2,92	4,15	2,54	5,77

A RNA escolhida para ser convertida em um programa C e utilizada nos agentes é a de 7x21x1 com 4.000 ciclos, devido a ser a rede com o menor erro no teste.

5.3. Simulação

Simulamos a seguinte operação: um agente monitor (satélite) monitora todo o terreno da área florestal, ao identificar uma área com foco de incêndio, envia uma mensagem para o agente líder (QG). 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 para 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 de volta a distância d (Equação 2) de cada agente de combate em reação ao incêndio.

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

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 completamente baseada em regras e pode ser visualizada nas Figuras 6 e 7. A regra pré-programada que define a posição final de cada agente na composição da formação da equipe (quando circular equidistante) pode ser vista nas Equações 3 e 4.

$$x_f = x_a + r \times \cos\left(i \times \frac{360}{q} \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (3)$$

$$y_f = y_a + r \times \sin\left(i \times \frac{360}{q} \times \frac{\pi}{180}\right) \quad (4)$$

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. Durante o deslocamento, as informações de posicionamento e velocidade do incêndio vão sendo atualizadas pelo satélite ao agente líder e deste aos agentes da equipe de combate. 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 e de áreas densas de vegetação. O método de combate de incêndio simulado é o método indireto. Os agentes de combate simulados são motoniveladeiras 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 visualizada nas Figuras 6 e 7.

Quanto ao controle de posicionamento, um sensor do tipo GPS é simulado em cada agente. Em experimentos que realizamos com um GPS *Garmin Etrex* (<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 6(b).

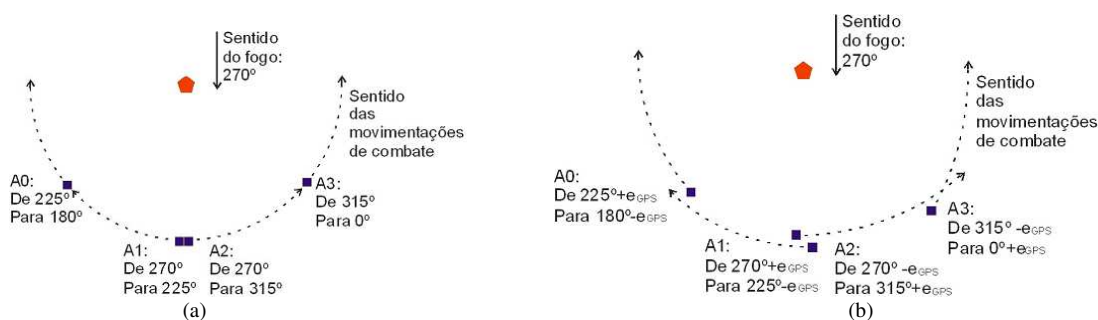


Figura 6. Exemplo de formação de combate quando o sentido do vento é de 270° e existem 4 agentes de combate: (a) não considera erro no GPS e (b) considerando erro no GPS, apresentando limites propositalmente redundantes

A Figura 6(a) apresenta o esquema de movimentação 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 na figura acima. Deste modo a preparação do aceiro (semi-círculo indicado na figura) não será executada de forma correta. A Figura 6(b) apresenta as correções adicionadas ao algoritmo de modo a obter uma trajetória que permita criar um aceiro incluindo o erro do GPS no modelo de deslocamento dos agentes. As Figuras 7(a) e 7(b) demonstram os resultados obtidos em uma das simulações realizadas, podemos perceber a trajetória de chegada dos agentes de combate, bem como o trajeto definindo o aceiro para a contenção do incêndio. A visualização em 2D permite ter uma idéia mais global da simulação. A visualização em 3D permite acompanhar melhor o desenvolvimento da ação de combate ao incêndio, e assim, analisar e propor melhorias no controle dos agentes de combate.

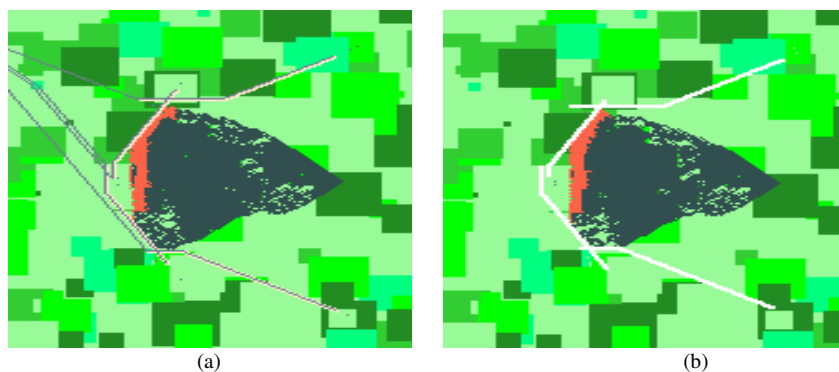


Figura 7. Resultado de uma simulação considerando o erro de GPS: (a) Trajetórias dos robôs-bombeiros e (b) Criação do aceiro.

6. Trabalhos futuros

O presente trabalho possui dois protótipos implementados que apresentam funcionalidades que permitem uma simulação de incêndios e sua propagação em áreas florestais. Uma primeira versão de planejamento de ações de combate foi proposta, bem como um modelo de deslocamento utilizando Redes Neurais Artificiais em agentes reativos. Entretanto, algumas funcionalidades poderiam ser adicionadas neste sistema, notadamente: (i) Implementação de um algoritmo de planejamento de trajetórias que leve em consideração os “custos do terreno”, fazendo a alteração do modelo de agentes

reativos para cognitivos; (ii) Implementação de novas estratégias de combate a incêndios, para comparação com a atual estratégia implementada, bem como para comparação com técnicas convencionais; (iii) Implementação de uma versão do sistema que permita o controle manual dos robôs-bombeiros, ao contrário do automático e autônomo, de modo a permitir o treinamento de equipes de combate a incêndio; (iv) Adaptação da atual implementação de modo a permitir incorporação automática (importação) de modelos reais de terrenos e de vegetação; (v) Validação das simulações junto a especialistas de combate a incêndio em florestas; (vi) Simulação física dos agentes e dos sensores/atuadores usando a biblioteca ODE; e (vii) Generalização do modelo para outras tarefas, como atuação em acidentes nucleares ou desastres ambientais.

7. 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, coordenada pelo QG, mas com controle de ação distribuído, onde cada agente possui autonomia na execução das tarefas que lhe são passadas. Cada tipo de agente possui um conjunto próprio de operações e o planejamento de suas ações envolve a comunicação com o demais agentes e os dados de seus sensores (*e.g.* GPS, odômetro, sensor de temperatura).

Utilizamos uma Rede Neural Artificial no controle de movimentação (percepção-ação) dos agentes de combate devido a sua movimentação ocorrer em um terreno desconhecido que simula aspectos naturais como tipos de vegetação e topografia. A comunicação através do uso de *blackboard* se mostrou bastante prática e simples de implementar. Como resultado deste projeto temos dois protótipos do sistema, um em *2D* e outro em *3D* que permite acompanhar a simulação e o deslocamento dos robôs bombeiros. Os primeiros resultados demonstraram que simulações realísticas utilizando agentes robóticos colaborativos com aprendizado podem vir a ter um papel muito importante no planejamento e execução de operações reais de combate a incêndios em áreas florestais, e possivelmente em outras tarefas similares, como acidentes nucleares ou desastres ambientais.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq, Capes, Unibic (Unisinos), FAPERGS e a FINEP (Projeto Rede Brasileira de Visualização) pelo apoio a este trabalho.

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.
- Batista, A.C. (2004) “Detecção de incêndios florestais por satélite”, *Revista Floresta* 34, Mai/Ago, 237-241, Curitiba, Paraná.
- Comissão Européia (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”, <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.
- Fonseca, J.M. (2001) “Protocolos de negociação com coligações em sistemas multi-agente”, Tese de Doutorado, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Heinen, F. J. (2000) “Robótica Autônoma: Integração entre Planificação e Comportamento Reativo”, Ed. Unisinos, São Leopoldo, RS, Brasil, 84 p.
- 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.
- Laboratório de Incêndios Florestais (2006) “Pesquisas e projetos em prevenção e combate de incêndios florestais”, UFPR, <http://www.floresta.ufpr.br/~firelab>, setembro.
- Ministério da Agricultura (2006) “Guia metodológico para elaboração de plano municipal e intermunicipal de defesa da floresta contra incêndios”, Apêndice 1: Metodologia para a elaboração da carta dos combustíveis florestais.
- Maes, P. (1996) “Intelligent software: easing the burdens that computers put on people”, IEEE Expert, v. 11, p. 62–63, 1996.
- Nwana, H. S. (1996) “Software agents: An overview”, Knowledge Engineering Review, v.11, n. 3, p.1–40.
- Osagie, P. (2006) “Distributed Control for Networked Autonomous Vehicles”. Dissertação de Mestrado, KTH Computer Science and Communication, 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: Research in Interactive Design - Proceedings of the Virtual Concept Conference (Summer School). Springer Verlag, 2006, v.2, p. 1-45.
- Pessin, G., Osório, F. S., Musse, S. R., Nonnemacher, V., Ferreira, S. S. (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.
- Reis, L.P. (2003) “Coordenação em sistema multi-agente: aplicações na gestão universitária e futebol robótico”, Tese de Doutorado, Universidade do Porto.
- 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.
- Siebra, C. (2000) “Uma arquitetura para suporte de atores sintéticos em ambientes virtuais – uma aplicação em jogos de estratégia”, Dissertação de Mestrado, UFPE.
- Wang, Y. & Silva, C.W. (2006) “Cooperative transportation by multiple robots with machine learnig”, IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vancouver, Canada.