

# Evoluindo Estratégias de Posicionamento em um Sistema Multi-Robótico Aplicado ao Combate de Incêndios Florestais

Gustavo Pessin<sup>1</sup>, Fernando Osório<sup>1</sup>, Soraia Musse<sup>2</sup>, Vinícius Nonnenmacher<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, vnonnenmacher,  
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 em áreas florestais, sem intervenção humana. O terreno simula diversos aspectos naturais e os robôs de combate são fisicamente simulados tendo sua navegação controlada por uma Rede Neural Artificial. Propomos neste artigo que a estratégia de posicionamento para atuação dos robôs bombeiros seja criada através do uso de Algoritmos Genéticos. Os resultados das simulações demonstram que o uso de Algoritmos Genéticos permite obter posições satisfatórias e que o sistema multi-agente proposto pode vir a ter um papel muito importante no planejamento e execução de operações reais de combate a incêndios florestais.*

## 1. Introdução

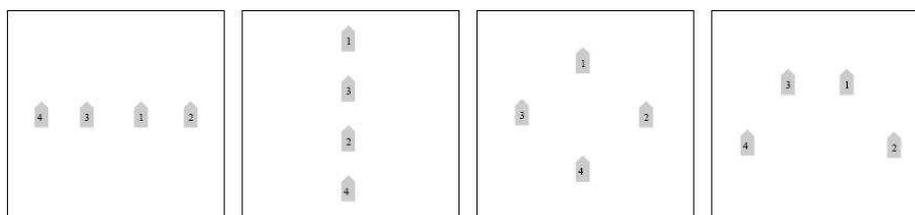
Com a evolução das pesquisas em robótica, cada vez mais os robôs estão se tornando complexos em termos físicos. A grande variedade de estudos em morfologia robótica tem desenvolvido variações de robôs dotados de diversos meios de locomoção (*e.g.* pernas, rodas, esteiras). Em paralelo a este desenvolvimento 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 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].

---

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

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 [CE 2006]. Os incêndios florestais causam diversos tipos de danos, quanto a prejuízos humanos, por exemplo, na Austrália, em 1983 um incêndio que atingiu cerca de 400.000ha matou 75 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].

O desenvolvimento de um sistema multi-robótico para atuação em monitoração e controle de incêndios em áreas florestais é um problema multidisciplinar. Envolve o uso de uma variedade de tecnologias de diferentes campos, como robótica móvel (*e.g.* controle de movimentação, fusão de sensores, modelagem robótica), envolve a coleta de informação de especialistas sobre incêndios, como comportamento de fogo em ambientes naturais, técnicas e métodos de monitoração e estratégias de combate. Na tarefa de controle de incêndio, uma das questões mais importantes tem relação com a formação do posicionamento dos agentes para atuação no combate. De acordo com as capacidades de atuação de cada agente, as condições climáticas (vento, chuva), a topografia e a vegetação, diferentes formações (Figura 1) podem ser sugeridas. Estas formações, quando sugeridas por um especialista, podem não levar em conta um número muito grande de variáveis, assim, a definição do posicionamento de formação poderia fazer uso de técnicas de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning* - ML). Uma técnica de ML indicada para estes casos é a de Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* - GA) [Holland 1975, Mitchell 1996], que são algoritmos de otimização global que empregam estratégia de busca paralela e estruturada, embora aleatória, direcionada a busca de pontos de aptidão [Carvalho et al. 2003], permitem assim a realização de busca multi-critério em um espaço multidimensional, por serem não supervisionados, não necessitam de nenhuma base de informação de antemão e, se corretamente utilizados são capazes de escapar de mínimos locais [Heinen and Osório 2006].



**Figura 1. Formações para uma equipe de quatro agentes (da esquerda para a direita: linha, coluna, circular ou ferradura) [Balch and Arkin 1999].**

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 a 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; (vi) Estudar a robustez das ações dos agentes pela leitura de dados de sensores sujeitos a erros.

Neste artigo descrevemos na Seção 2 características de Aprendizado de Máquina e de Algoritmos Genéticos. Na Seção 3 descrevemos brevemente conceitos de simulação e modelagem e de técnicas e operações reais de identificação e combate a incêndios florestais. Na Seção 4 descrevemos o ambiente desenvolvido, a operação multi-agente de identificação e combate, o desenvolvimento e a aplicação do Algoritmo Genético. Finalizamos apresentando trabalhos futuros e a conclusão do trabalho realizado.

## 2. Aprendizado de Máquina e Algoritmos Genéticos

Aprendizado de Máquina (*Machine Learning* - ML) é uma área da Inteligência Artificial que tem como objetivo desenvolver técnicas computacionais de aprendizado e de aquisição de conhecimentos [Rezende 2003]. Essas técnicas devem exibir um comportamento inteligente e realizar tarefas complexas com um nível de competência equivalente ou superior ao de um especialista humano [Nikolopoulos 1997]. Para a construção do sistema proposto neste artigo utilizamos um GA, assim, descrevemos sucintamente suas características a seguir. Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* - GA) [Holland 1975, Mitchell, 1996] são técnicas de otimização global que empregam estratégia de busca paralela e estruturada, embora aleatória, direcionada a busca de pontos de aptidão [Carvalho et al. 2003]. Devido a ser uma técnica estocástica, é classificado como não supervisionado, visto que não necessita de nenhuma base de informação de antemão. Os GA utilizam procedimentos iterativos que simulam o processo de evolução de uma população de possíveis soluções de um determinado problema. A cada iteração do algoritmo (uma geração), um novo conjunto de estruturas é criado através da troca de informações (bits ou blocos) entre estruturas selecionadas da geração anterior [Goldberg 1989]. Um GA é estruturado de forma que as informações referentes a um determinado sistema possam ser codificadas de maneira análoga a cromossomos biológicos, como uma seqüência de valores, onde cada fragmento da seqüência usualmente representa uma variável. O primeiro passo de um GA típico é a geração de uma população inicial de indivíduos, usualmente formada por um conjunto aleatório que representa diversas soluções do problema. Durante o processo evolutivo, cada indivíduo da população é avaliado através de uma função de aptidão (*fitness*) que permite mensurar o quanto cada indivíduo está apto a resolver o problema. Nos indivíduos selecionados, é feito *crossover* e mutação, gerando descendentes para a próxima geração [Lacerda and Carvalho 1999, Nolfi and Floreano 2000, Carvalho et al. 2003]. O *crossover* e a mutação transformam uma população através de sucessivas gerações e possibilitam assim que o GA percorra os melhores pontos do espaço de busca até chegar a um resultado satisfatório [Goldberg 1989]. A GALib (<http://lancet.mit.edu/ga/>) é uma biblioteca de software livre desenvolvida por Matthew Wall do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em C++ que contém um conjunto bastante amplo de funções relacionadas a programação de Algoritmos Genéticos. A GALib é uma das mais completas e eficientes bibliotecas de software para a simulação de Algoritmos Genéticos, permitindo experiências com diferentes funções objetivo (*fitness*), diversas representações genéticas, diversos operadores genéticos, e diversos métodos de seleção.

## 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, assim optamos por desenvolver nosso próprio ambiente. 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: *Open Dynamics Engine* - ODE ([www.ode.org](http://www.ode.org)), *Open Scene Graph* - OSG ([www.openscenegraph.org](http://www.openscenegraph.org)), *Demeter* ([www.tbgssoftware.com](http://www.tbgssoftware.com)), e a *Simple DirectMedia Layer* – SDL ([www.libsdl.org](http://www.libsdl.org)). A função de cada uma destas bibliotecas é explicada no decorrer do texto.

### 3.1 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 Perera 2001]. A operação de combate ou supressão de um incêndio envolve seis etapas distintas [LIF 2006]: detecção, comunicação, mobilização, deslocamento, planejamento, e combate. Existem quatro métodos de combate ao fogo nos incêndios florestais [LIF 2006]: método direto, método paralelo ou intermediário, método indireto, e método aéreo. 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 aos demais meios de detecção [Batista 2004].

## 4. Ambiente de Simulação

O protótipo do sistema foi implementado em C++, a biblioteca OSG é responsável pela saída gráfica 3D do protótipo, o *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). Este conjunto permite que os robôs simulados fisicamente respeitem questões como gravidade, inércia e atrito. A biblioteca SDL é responsável pela saída gráfica 2D, utilizada na visualização dos resultados do GA.



**Figura 2. Ambiente completo (a) Um veículo preso em uma árvore e (b) Vista do grupo em deslocamento até o incêndio.**

A implementação do protótipo (Figura 2) iniciou com a criação de um mapa que simula a integração das informações de vegetação, topografia e comportamento de fogo descritas na Subseção 3.1. O estudo dos modelos de florestas e resíduos florestais é de grande importância

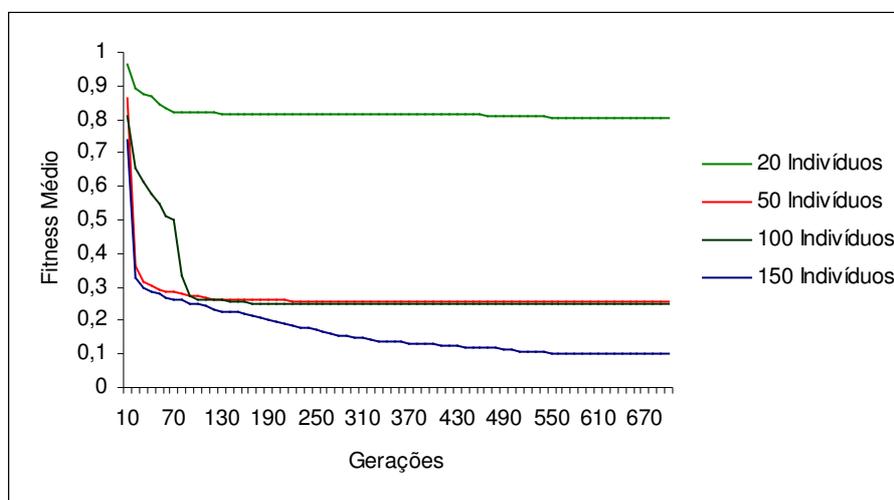
para o aprimoramento dos modelos de simulação a serem implementados em ambientes virtuais [Pessin et al. 2007b]. A criação dos mapas teve como base cartas topográficas e o mapa de modelos de combustíveis florestais do Ministério da Agricultura do Brasil. Para a simulação da vegetação e correta propagação 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 e intensidade do vento e tipos de vegetações podemos construir a simulação de propagação do fogo. A velocidade de propagação respeita dados do modelo retirados de [Koproski 2005].

#### 4.1. Evoluindo Estratégias de Posicionamento

O ambiente conta com um grupo de  $n$  robôs de comportamento reativo (controlados por uma RNA) 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). O controle da navegação dos robôs móveis através de RNA e a morfologia física (e.g. motores, sensores) dos robôs podem ser vistos em [Pessin et al. 2007a]. O mecanismo de planejamento usa um GA para definir as posições iniciais e finais de atuação de cada robô no combate ao incêndio. Estas posições são especificamente: ângulo inicial e final e raio inicial e final, ambos em relação ao ponto inicial do foco de incêndio. 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 a Figura 3(b). O genoma desenvolvido para as simulações iniciais pode ser visto na Tabela 1. Neste, estão presentes informações de todo o grupo dos agentes envolvidos, assim, o tamanho do genoma é dependente da quantidade de agentes no sistema. Realizamos simulações considerando a existência de 4 agentes de combate.

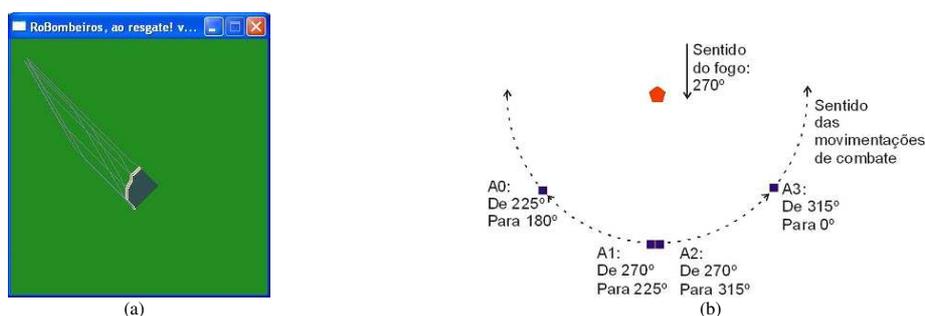
**Tabela 1. Genoma dos indivíduos.**

Gene	Função	Valor Mínimo	Valor Máximo
0	Posição inicial do agente 0	0,000°	360,000°
1	Posição final do agente 0 e inicial do agente 1	0,000°	360,000°
2	Posição final do agente 1 e inicial do agente 2	0,000°	360,000°
3	Posição final do agente 2 e inicial do agente 3	0,000°	360,000°
4	Posição final do agente 3	0,000°	360,000°
5	Raio inicial do agente 0	10,000m	100,000m
6	Raio final do agente 0 e inicial do agente 1	10,000m	100,000m
7	Raio final do agente 1 e inicial do agente 2	10,000m	100,000m
8	Raio final do agente 2 e inicial do agente 3	10,000m	100,000m
9	Raio final do agente 3	10,000m	100,000m

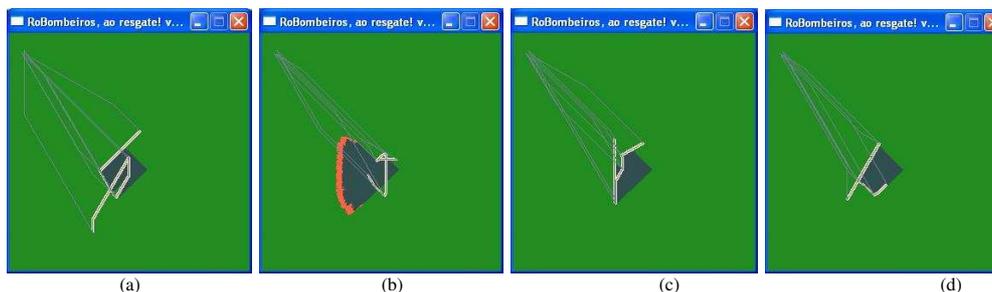


**Gráfico 1. Evolução do *fitness* médio (normalizado) de acordo com o número de gerações, para diferentes quantidades de indivíduos.**

O *fitness* desenvolvido acumula os seguintes valores finais de cada simulação: (i) Total de área queimada: busca minimizar a área queimada; (ii) Total de área com aço: busca minimizar a área de trabalho dos robôs, e; (iii) Erro médio absoluto: busca minimizar a diferença entre a média geral de aços úteis em relação ao aço útil de cada indivíduo, assim, o tamanho das áreas de trabalho tende a se equalizar. Buscamos, na simulação, minimizar o valor do *fitness*, o Gráfico 1 mostra o resultados das simulações com diversos tamanhos de população. Podemos ver o *fitness* diminuindo com o passar das gerações. A simulação com 150 indivíduos foi a que chegou ao menor *fitness*, podemos ver o resultado satisfatório desta simulação na Figura 3(a). A Figura 4 apresenta simulações com resultados não satisfatórios.



**Figura 3. (a) Resultado da simulação com 150 indivíduos e 700 gerações, a área preta é a área queimada, as linhas azuis são os trajetos dos robôs, a linha na cor bege é a área de criação de aço. (b) Modelo teórico de atuação.**



**Figura 4. Resultado de simulações não satisfatórias: (a) e (b) 20 indivíduos com 700 gerações (sementes aleatórias diferentes), (c) 50 indivíduos com 700 gerações e (d) 100 indivíduos com 700 gerações.**

O genoma resultante das 700 gerações com 150 indivíduos (Figura 3(a)) apresentou, na última geração os seguintes valores absolutos de *fitness*: média=3.076,88; maior=3.099,00; menor=3.040,00; desvio padrão=10,56. O cromossomo final pode ser visto abaixo.

225,72°	199,26°	174,12°	155,20°	136,38°	27,35m	30,45m	33,94m	38,08m	35,96m
---------	---------	---------	---------	---------	--------	--------	--------	--------	--------

## 5. Trabalhos Futuros

O presente trabalho possui dois protótipos implementados que apresentam funcionalidades que permitem a simulação de incêndios e sua propagação em áreas florestais. O primeiro protótipo [Pessin et al. 2007a] possui o controle de deslocamento dos agentes móveis em um ambiente de simulação baseado em física utilizando Redes Neurais Artificiais. O segundo protótipo, proposto neste artigo, contém a simulação do agente deliberativo (mecanismo de planejamento) que realiza evolução baseada em GA para obter estratégias de posicionamento satisfatórias para o combate ao incêndio. O próximo passo deste projeto é a integração dos protótipos e a sincronização da operação multi-agente.

## 6. Conclusões

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. O ambiente desenvolvido apresenta simulação de propagação de fogo baseado em tipos de vegetação, orientação e intensidade do vento. O resultado das simulações usando Algoritmos Genéticos permitiu obter uma estratégia de posicionamento eficiente para atuação dos robôs bombeiros, demonstrando que o sistema multi-agente proposto pode vir a ter um papel muito importante no planejamento e execução de operações reais de combate a incêndios florestais.

## 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.
- Balch, T., Arkin, R. C. (1999) “Behavior-based formation control for multi-robot teams”. *IEEE Transactions on robotics and automation*.
- Batista, A. C. (2004) “Detecção de incêndios florestais por satélite”, *Revista Floresta* 34, p. 237-241.
- Carvalho, A. C. F.; Braga, A. P.; Ludermir, T. B. (2003) “Sistemas inteligentes: Fundamentos e aplicações”. In: . Barueri, SP, Brasil: Manole, Cap. Computação Evolutiva, p. 225–248.
- CE - 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”, [www.cptec.inpe.br/queimadas](http://www.cptec.inpe.br/queimadas), outubro.
- Dudek, G., Jenkin, M. (2000) “Computational Principles of Mobile Robotics” The MIT Press.
- Go, J., Browning, B., Veloso, M. (2004) “Accurate and flexible simulation for dynamic, vision-centric robots”. *International Joint Conference on Autonomous Agents*.
- Goldberg, D. E. (1989) “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning” Boston, MA, USA: Addison-Wesley Professional, 432 p.
- Heinen, M. R.; Osório, F. S. (2006) “Algoritmos genéticos aplicados ao problema de roteamento de veículos” *Hifen*, v. 30, n. 58, p. 89–96, 2006.
- Holland, J. (1975) “Adaptation in Natural and Artificial Systems” Michigan Press.
- Koproski, L.P. (2005) “O fogo e seus efeitos sobre a herpetofauna e a mastofauna terrestre no parque nacional de Ilha Grande”, *Dissertação de mestrado*, UFPR.
- Lacerda, E. G. M.; Carvalho, A. C. P. L. F. (1999) “Introdução aos algoritmos genéticos”. *XVIII Jornada de Atualização em Informática, XIX CSBC*, v. 2, p. 51–126.
- 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.
- Mitchell, M. (1996) “An Introduction to Genetic Algorithms”. Cambridge, MA, The MIT Press.
- Nikolopoulos, C. (1997) “Expert Systems - Introduction to First and Second Generation and Hybrid Knowledge Based Systems”. New York, USA: Marcel Dekker Inc. Press.
- Nolfi, S.; Floreano, D. (2000) “Evolutionary Robotics: The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines” The MIT Press.
- Osagie, P. (2006) “Distributed Control for Networked Autonomous Vehicles”. *Dissertação de Mestrado*, KTH CSC, Royal Institute of Technology, Sweden.
- Pessin, G. et al. (2007a) “Utilizando Redes Neurais Artificiais no Controle de Robôs Móveis Aplicados no Combate de Incêndios Florestais”, *XVI Seminário de Computação*, Blumenau, SC, p. 19-30.
- Pessin, G. et al. (2007b) “Simulação Virtual de Agentes Autônomos para a Identificação e Controle de Incêndios em Reservas Naturais”, *IX SVR*, v.1, p. 236-245.
- Pfeifer, R., Scheier, C. (1999) “Understanding Intelligence”. Cambridge, 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.
- Rezende, S.O. (2003) “Sistemas inteligentes: fundamentos e aplicações”, Ed. Manole, São Paulo.