

MODELAGEM COMPORTAMENTAL PARA AGENTES AUTÔNOMOS
EM AMBIENTE REAIS

Claudio Antonio da Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO –
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO GEOMÁTICA – MESTRADO DA FACULDADE
DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO – ÁREA DE
CONCENTRAÇÃO GEOMÁTICA.

Aprovada por:

Oscar Luiz Monteiro de Farias, D.Sc.

Roberto de Beauclair Seixas, D.Sc.

Orlando Bernardo Filho, D.Sc.

Marcelo Tílio Monteiro de Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2003

SILVA, CLAUDIO ANTONIO DA

Modelagem Comportamental para
Agentes Autônomos em Ambientes Reais [Rio
de Janeiro] 2003

X, 85 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, M.Sc.,
Engenharia da Computação – Área de
Concentração Geomática, (2003))

Tese – Universidade do Estado do Rio
de Janeiro – UERJ

1. Agentes Autônomos
2. SIG

I. FEN/UERJ II. Título (série)

Em memória de meu pai.

Os meus sinceros agradecimentos:

- a minha mãe, paraibana arretada, por me ensinar a arte de balançar sem cair diante das adversidades.
- a magrela, minha namorada, pela compreensão.
- a Roberto de Beauclair Seixas a minha eterna gratidão pelos ensinamentos que moldaram a minha maneira de pensar e transformaram minha vida profissional.
- ao Prof. Bin Jiang, da Universidade de Gävle na Suécia, pela valiosa cooperação no desenvolvimento do estudo de caso urbano.
- ao Prof. Oscar Luiz Monteiro de Farias pelo apoio em mais esta empreitada.
- a Marcelo Tílio Monteiro de Carvalho pela confiança e consideração.
- ao Corpo de Fuzileiros Navais do Centro de Instrução Sylvio de Camargo pelas informações fornecidas para o desenvolvimento do estudo de caso militar.
- aos colegas do grupo de GIS do laboratório Tecgraf da PUC-Rio por oferecerem um ambiente de trabalho descontraído, o que aliviou a tensão de alguns momentos.
- a FAPERJ pela ajuda financeira através da bolsa concedida.

Resumo da tese apresentada à FEN/UERJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM COMPORTAMENTAL PARA AGENTES AUTÔNOMOS EM AMBIENTES REAIS

Claudio Antonio da Silva

Setembro/2003

Orientadores: Oscar Luiz Monteiro de Farias

Roberto de Beauclair Seixas

: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação – Área de Concentração
Geomática – Mestrado

Este trabalho apresenta uma modelagem de comportamentos de manobra para agentes autônomos simularem a movimentação de soldados em um terreno, baseada em algumas regras simplificadas de combate, e de pedestres em uma região urbana, baseada em alguns resultados empíricos da literatura.

Como a movimentação de soldados e de pedestres ocorre em ambientes reais (regiões do espaço geográfico), propomos a integração do modelo de agentes com os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) porque estes sistemas possuem um conjunto de ferramentas específicas para criar e gerenciar representações precisas do espaço geográfico.

São raras as aplicações que efetivamente implementam essa integração. Assim, como contribuição, desenvolvemos dois protótipos que permitem a utilização de dados de SIGs para simular as situações abordadas. Para isso, foi especificada uma arquitetura para construção de sistemas baseados em agentes.

Abstract of Thesis presented to FEN/UERJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

BEHAVIORAL MODELING FOR AUTONOMOUS AGENTS
IN REAL ENVIRONMENTS

Claudio Antonio da Silva

September/2003

Advisors: Oscar Luiz Monteiro de Farias

Roberto de Beauclair Seixas

Program Computing Engineering – Geomatic

This work presents a steering behavioral modeling for autonomous agents to simulate soldiers moving around a terrain, based in some simplified warfare rules, and pedestrians walking in a urban region, based in some empirical results from literature.

Once the movement of soldiers and pedestrians occurs in real environments (regions in the geographical space), we propose the integration between the agent's model and Geographical Information Systems (GIS) because these systems contains specific tools to manage and create precise representations for the geographical space.

There are a little number of applications that effectively implement this integration. Then, as contribution we developed two prototypes that allow us to use GIS data to simulate the situations mentioned above. Hence, we specified an architecture to develop agent based systems.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 AGENTES.....	4
2.1 MODELO DE AGENTES	5
2.1.1 Estado Interno.....	6
2.1.2 Percepção	7
2.1.3 Modelagem Comportamental.....	11
2.1.3.1 Comportamentos Genéricos.....	11
2.2 AGENTES X AUTÔMATOS CELULARES	13
3 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.....	15
3.1 AMBIENTES REAIS	15
3.2 INTEGRAÇÃO ENTRE AGENTES E SIGs	16
3.3 MODELO DO AMBIENTE	17
4 ARQUITETURA PARA CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS.....	19
5 ESTUDO DE CASOS.....	23
5.1 CASO MILITAR	23
5.1.1 Poder de combate.....	24
5.1.2 Engajamento	27
5.1.3 Cálculo dos Danos	28
5.1.4 Plano Tático.....	30
5.1.4.1 Ocorrência de situações simultâneas.....	34
5.1.5 Modelagem Comportamental.....	35
5.1.5.1 Ações não previstas no plano (Patrulha).....	36
5.1.5.2 Ações do Plano	37
5.1.6 Ambiente	41
5.1.6.1 Terreno e Mobilidade.....	41
5.1.6.2 Terreno e Acuidade Visual.....	43
5.1.7 Protótipo Militar.....	46
5.2 CASO URBANO	49
5.2.1 Características do Movimento de Pedestres	50
5.2.1.1 Área de Conforto	50
5.2.1.2 Resistência para tomar direção oposta.....	51
5.2.1.3 Formação de Filas.....	52
5.2.2 Fatores que Influenciam o Movimento de Pedestres.....	53
5.2.2.1 Atividades e Necessidades	54
5.2.2.2 Atrações	55
5.2.2.3 Área de Influência das Atrações	57

5.2.3 Planejamento de Caminhos.....	62
5.2.4 Modelagem Comportamental.....	63
5.2.4.1 Seguir Caminho	64
5.2.4.2 Evitar Colisão	64
5.2.5 Ambiente	65
5.2.6 Protótipo Urbano	67
6 RESULTADOS	69
6.1 CASO MILITAR: COERÊNCIA DO MODELO DE ATRITO.....	69
6.2 CASO MILITAR: DETECÇÃO DE INIMIGO	71
6.3 CASO URBANO: FORMAÇÃO DE FAIXAS PREFERENCIAIS	74
6.4 CASO URBANO: TRATAMENTO DE COLISÕES	76
7 CONCLUSÕES.....	78
8 TRABALHOS FUTUROS	81
9 REFERÊNCIAS.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de Agentes.	6
Figura 2. Ângulo entre o vetor deslocamento e o eixo Y.	7
Figura 3. Modelo cardioidal e a simplificação adotada.	8
Figura 4. Simplificação do modelo cardioidal.	9
Figura 5. Cálculo de visibilidade.	9
Figura 6. Agentes não estão visíveis entre si.	10
Figura 7. Agente 1 está visível para o Agente 2.	10
Figura 8. Cálculo do vetor para comportamento <i>Retroceder</i>	12
Figura 9. Cálculo do vetor para comportamento <i>Evitar Colisão</i>	13
Figura 10. Representações vetorial e matricial.	18
Figura 11. Arquitetura baseada em 3 camadas.	20
Figura 12. Fluxograma de execução.	21
Figura 13. Poder de combate de um pelotão e de uma companhia	26
Figura 14. Agente com poder de combate e campo visual.	27
Figura 15. Atrito entre oponentes com grande diferença de poder de combate.	30
Figura 16. Atrito entre oponentes com pequena diferença de poder de combate.	30
Figura 17. Plano tático.	31
Figura 18. Cálculo do evento “Possibilidade de Engajamento”.	34
Figura 19. Prioridade das situações.	35
Figura 20. Percurso de Patrulha.	36
Figura 21. Modelo de Elevações do terreno	43
Figura 22. Trafegabilidade do terreno	43
Figura 23. Terreno não obstruiu a linha de visão.	45
Figura 24. Terreno obstruiu a linha de visão.	46
Figura 25. Interface do protótipo.	48
Figura 26. Agente com sua área de conforto e campo visual.	51
Figura 27. Formação de filas.	52
Figura 28. Formação de faixas preferenciais.	53
Figura 29. Diagrama de Voronoi.	58
Figura 30. <i>Grid</i> com atrações.	60
Figura 31. Iterações para gerar as áreas de influência.	60
Figura 32. Simplificação para o Diagrama de Voronoi.	61

Figura 33. Distância entre pedestre e duas atrações.	61
Figura 34. Percurso do pedestre até as atrações.	62
Figura 35. Campo visual e área de colisão.	65
Figura 36. Imagem aérea.	66
Figura 37. Imagem aérea com ruas destacadas.	66
Figura 38. Imagem aérea com quadras destacadas.	67
Figura 39. Interface do protótipo.	68
Figura 40. Elemento atacando duas patrulhas de defesa.	70
Figura 41. Evolução do engajamento entre os elementos.	70
Figura 42. Elemento de combate de ataque próximo de patrulhas de defesa.	71
Figura 43. Patrulha de defesa percebe oponente.	72
Figura 44. Patrulha de defesa perseguindo oponente.	72
Figura 45. Segunda patrulha percebe situação de Alerta Inimigo.	73
Figura 46. Engajamento entre os elementos.	73
Figura 47. Elementos voltando à patrulha, após a eliminação do oponente.	74
Figura 48. Agentes se deslocando por uma rua.	75
Figura 49. Faixa com agentes se deslocando de cima para baixo.	75
Figura 50. Faixa com agentes se deslocando de baixo para cima.	76
Figura 51. Aglomeração de agentes em uma rua.	77
Figura 52. Trajeto de um agente evitando colisões.	77

1 Introdução

A abordagem descentralizada tem sido muito utilizada para a simulação de sistemas complexos. Esta abordagem propõe que o comportamento complexo de alguns sistemas é decorrente das interações entre seus componentes. A tendência para assumir a existência de um controle central, subjacente aos sistemas, torna difícil o entendimento de muitos fenômenos ao nosso redor. A resistência à abordagem descentralizada é decorrente de um hábito *Newtoniano* de pensar, cujo foco está no comportamento global do sistema e não considera a ação de seus componentes. Enquanto a abordagem *Newtoniana* utiliza macro-modelos, para reproduzir o comportamento observável dos sistemas, a descentralizada introduz o conceito de micro-simulação. Este método consiste em construir modelos microscópicos (ao nível dos componentes) com a capacidade de reproduzir as leis macroscópicas do sistema, através da simulação de cada componente individualmente, quando interagem entre si (Claramunt & Jiang 2001).

Para a criação desses modelos individuais, de modo que possam simular os componentes de um sistema, torna-se necessário alguma técnica ou tecnologia. Em geral, as alternativas são os autômatos celulares ou os agentes autônomos. Por razões que serão abordadas posteriormente (na seção 2.3), utilizou-se o conceito de agentes autônomos para modelar os casos estudados neste trabalho.

O termo agentes autônomos é relativamente recente e surgiu dos estudos na área de Inteligência Artificial (Wooldridge 1995). Existem diferentes e até conflitantes definições para o termo, conforme pode ser conferido em (Ingham 1997). Segundo Maes (1995), **agentes são sistemas computacionais inseridos em ambientes complexos e/ou dinâmicos, que têm a capacidade de perceber e agir de modo autônomo, para atingir objetivos ou executar tarefas para os quais tenham sido modelados.** O termo ambiente refere-se a uma representação do sistema sendo estudado, onde os agentes são simulados.

Um modelo baseado em agentes consiste na criação de uma população de agentes, com capacidade de percepção e ação similar aos componentes simulados. Para que os agentes possam agir, como se fossem os próprios componentes de um sistema, deve-se dotá-los de comportamentos (regras que definem suas possíveis ações). Isto é feito através da modelagem de comportamentos, que consiste em analisar os componentes de um sistema e extrair as suas principais características para que possam ser

incorporadas nos respectivos agentes. Desta forma, a modelagem de comportamentos é uma etapa fundamental na criação de um modelo baseado em agentes.

A validade da modelagem baseada em agentes é ilustrada em (Reynolds 1987), que apresenta um modelo para a simulação do movimento de bandos, manadas e cardumes. Naquele trabalho, Reynolds (1987) conseguiu reproduzir o comportamento de bando, observável em algumas espécies de pássaros, para um conjunto de “*Boids*” (denominação dada ao modelo individual de pássaro), sem que no modelo houvesse uma regra **explícita** para que esses “*Boids*” se agrupassem e se comportassem como um bando.

Embora o conceito de agentes seja abrangente e possa ser empregado em vários campos de pesquisa, existem poucas aplicações no estudo de fenômenos antrópicos (fenômenos relacionados com a ação humana, como por exemplo o tráfego de pedestres e os confrontos militares), utilizando dados reais para representar o ambiente. Para isso, é fundamental a integração do modelo de agentes com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A utilização de dados reais georeferenciados de um SIG permite uma representação para o ambiente mais próxima da realidade. Além disso, a integração de agentes e SIGs pode ser útil no monitoramento e previsão das transformações no espaço geográfico. No entanto, devido às implicações desta abordagem (agentes em ambiente reais) não serem de fácil solução, são raras as aplicações que efetivamente implementam essa integração.

Este trabalho apresenta uma modelagem de comportamentos de manobra para agentes autônomos simularem a movimentação de soldados em um terreno, baseada em algumas regras simplificadas de combate, e de pedestres em uma região urbana, baseada em alguns resultados empíricos da literatura.

Com a finalidade de ilustrar a modelagem proposta, desenvolveu-se dois protótipos que permitem a utilização de dados de SIGs para simular a movimentação de soldados e pedestres. Entretanto, para possibilitar o desenvolvimento dos protótipos, foi necessário especificar uma arquitetura que atendesse aos requisitos de *software* baseado em agentes.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: o capítulo 2 apresenta os principais conceitos relacionados com agentes e o modelo adotado neste trabalho; o capítulo 3 apresenta o ambiente de simulação e a integração com SIGs; o capítulo 4 apresenta a arquitetura adotada para implementar os estudos de caso; o capítulo 5 apresenta o estudo de casos e expande as idéias iniciais do modelo de agentes e do

ambiente; o capítulo 6 apresenta alguns resultados obtidos nas simulações; o capítulo 7 apresenta algumas conclusões e o capítulo 8 aponta algumas direções que podem ser exploradas futuramente a partir deste trabalho.

2 Agentes

O conceito de agentes autônomos é relativamente recente e surgiu dos estudos na área de Inteligência Artificial (IA) (Wooldridge 1995). A abordagem de agentes em IA costuma ser complexa, devido ao foco que é dado ao problema de reproduzir aspectos da inteligência humana, tais como: raciocínio lógico, aprendizado e capacidade de planejamento. A dificuldade para a solução destes problemas permitiu o surgimento de abordagens alternativas para a utilização de agentes.

Destacam-se os trabalhos de Brooks (1990) (1991), que defendem a idéia de que os agentes podem exibir um comportamento inteligente, sem que necessariamente utilizem representações simbólicas explícitas de conhecimento e mecanismos de raciocínio lógico, tal como é suposto em IA. Estes trabalhos sugerem que se deve tomar os animais como exemplo, porque, embora não sejam dotados de mecanismos complexos de raciocínio, exibem padrões de comportamento inteligentes para sobreviverem.

Pode-se encontrar várias definições para o termo agentes autônomos, inclusive algumas conflitantes. Em (Ingham 1997), é apresentada uma definição baseada na discussão dos conceitos adotados em vários trabalhos da área de *software* baseado em agentes. Adotou-se, neste trabalho, a definição de Maes (1995), que diz: **agentes são sistemas computacionais inseridos em ambientes complexos e/ou dinâmicos, que têm a capacidade de perceber e agir de modo autônomo para atingir objetivos ou executar tarefas para os quais tenham sido modelados.**

Esta definição, assim como outras, é ampla o suficiente para permitir a utilização de agentes em várias áreas da ciência. Daí, surgem vários tipos de agentes. O tipo do agente está relacionado com as características que este possui. Assim, para citar alguns exemplos, podemos ter os agentes móveis (*Mobile Agents*), que têm a capacidade de trafegar por uma rede de computadores, atuando como negociadores em mercados virtuais ou como exploradores de bases de dados distribuídas, e os agentes de interface (*Interface Agents*), cuja finalidade é assistir aos usuários na utilização de determinados programas (*software*).

Nem sempre os agentes, em função de suas características, possuem uma denominação específica, tal qual os exemplos apresentados. Neste trabalho, serão abordados agentes cuja característica é simular pessoas se movimentando no espaço geográfico. Tais agentes podem ser encontrados com a denominação de Agentes

Espaciais Móveis (*Spatial Agents* ou, ainda, *Spatially Explicit Mobile Agents*) mas isso não é uma regra.

2.1 Modelo de Agentes

Utilizando a abordagem descentralizada, é possível simular a movimentação de pessoas no espaço geográfico, a partir de um modelo que seja capaz de reproduzir o movimento de uma só pessoa (modelo individual). Segundo esta abordagem, os padrões (ou efeitos) observados na movimentação de várias pessoas, podem ser entendidos como o resultado das decisões tomadas por cada pessoa em decorrência da proximidade entre elas e do ambiente em que estejam localizadas. Desta forma, a compreensão do indivíduo se torna muito importante para entender o funcionamento do movimento como um todo.

Para a construção destes modelos individuais empregam-se as técnicas de autômatos celulares ou de agentes autônomos. Existem vários exemplos de modelos computacionais baseados na técnica de autômatos celulares. Entretanto, conforme será explicado na seção 2.3, o modelo proposto neste trabalho fundamenta-se na técnica de agentes autônomos, ou seja, cada modelo individual será baseado em agentes.

Um modelo baseado em agentes consiste na criação de uma população de agentes, capazes de reproduzir as características do componente que estiver sendo simulado. Neste trabalho, o componente que será simulado constitui pessoas e a característica que busca-se poder simular é a movimentação dessas pessoas.

Este trabalho abordará a movimentação de pessoas em situações bastante distintas, a saber: soldados em confrontos militares e pedestres em centros urbanos. A princípio, poderia-se prever a necessidade de definir dois modelos de agentes, um para cada situação, uma vez que as características de movimentação de um soldado são diferentes de um pedestre. Entretanto, a característica que está sob investigação é comum nas duas situações: a movimentação no espaço geográfico.

Com isso, foi possível definir um modelo de agentes genérico, onde foram incorporados os componentes básicos para tornar os agentes capazes de se movimentarem em um ambiente. Para atender às especificidades das situações militar e urbana, o modelo proposto foi expandido posteriormente. Assim, esta seção descreve o modelo genérico com seus componentes e o capítulo 5 apresenta as adaptações que foram necessárias para que o modelo atendesse às situações militar e urbana.

De um modo geral, para que os agentes possam realizar seus movimentos, de forma objetiva e livre de colisões, faz-se necessário dotá-los de mecanismos para perceber o ambiente e para realizar ações (especificamente manobras em seu movimento). Além destes mecanismos, o modelo deve permitir que os agentes possam ter algumas propriedades para indicar seu estado atual (fome, cansaço, etc.) na simulação.

A Figura 1 ilustra o modelo proposto, indicando seus componentes e o fluxo de informações entre eles. Nas próximas seções, cada componente será discutido detalhadamente.

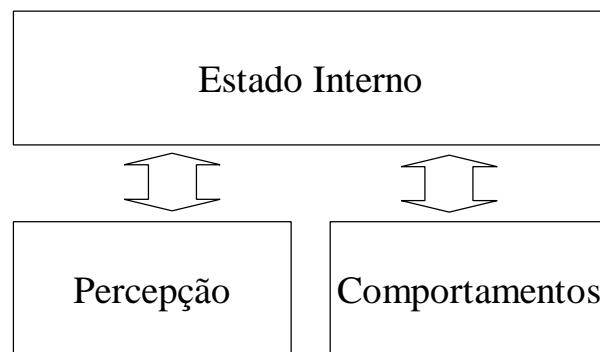


Figura 1. Modelo de Agentes.

2.1.1 Estado Interno

O estado interno é onde são armazenadas as propriedades dos agentes relacionadas com seus objetivos, motivações e situação atual. Estas propriedades são definidas em decorrência das características que se deseja incorporar aos agentes. Inicialmente, considerou-se apenas as características relacionadas com a movimentação das pessoas. O estado interno pode ser interpretado como a “mente” do agente.

Assim, foram definidos um conjunto de propriedades que permitem descrever o movimento dos agentes. Na tabela a seguir, estas propriedades são apresentadas acompanhadas de sua descrição.

Propriedade	Descrição
Orientação	Armazena o ângulo de orientação do agente.
Ângulo Máximo de Giro	Armazena o desvio angular máximo que o agente pode efetuar entre ciclos consecutivos da simulação.
Velocidade Máxima	Armazena a velocidade máxima que o agente pode atingir.
Velocidade Instantânea	Armazena a velocidade atual do agente.
Posição	Armazena a coordenada atual do agente no ambiente.
Objetivo	Define um vetor na direção do objetivo do agente.

É importante salientar, que os ângulos armazenados nas propriedades **Orientação** e **Ângulo Máximo de Giro** são definidos em relação a um eixo vertical imaginário que passa pela posição do agente, conforme mostra a Figura 2.

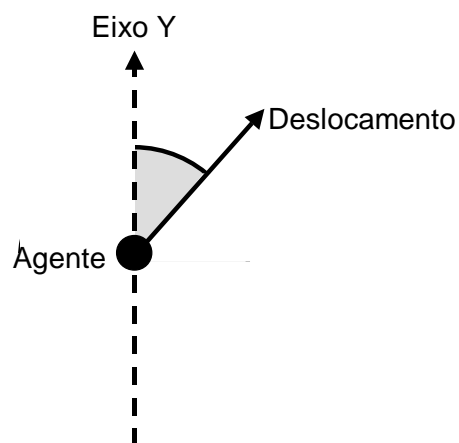


Figura 2. Ângulo entre o vetor deslocamento e o eixo Y.

As propriedades do estado interno podem ser alteradas em função do que é percebido no ambiente e da interação com outros agentes.

2.1.2 Percepção

Para que os agentes possam navegar pelo ambiente de modo autônomo, evitando colisões e decidindo qual ação adotar a cada momento, é necessário que eles sejam capazes de perceber o ambiente no qual estejam inseridos. Uma ação somente pode ser executada pelo agente após uma análise da situação ao seu redor.

Embora o termo percepção esteja associado ao recebimento de informações através dos cinco sentidos humanos, ao modelar-se agentes, o mecanismo de percepção

geralmente se resume a implementação de uma visão sintética, isto é, uma construção geométrica que possa ser utilizada para obter as informações desejadas do ambiente.

Adotou-se uma visão sintética baseada em uma simplificação do modelo cardioidal, que é utilizado para representar o campo visual humano. O modelo cardioidal sugere que a visão humana tem um alcance máximo frontal, que se reduz lateralmente até um ponto cego atrás da cabeça. A Figura 3 mostra a curva cardióide e a simplificação adotada.

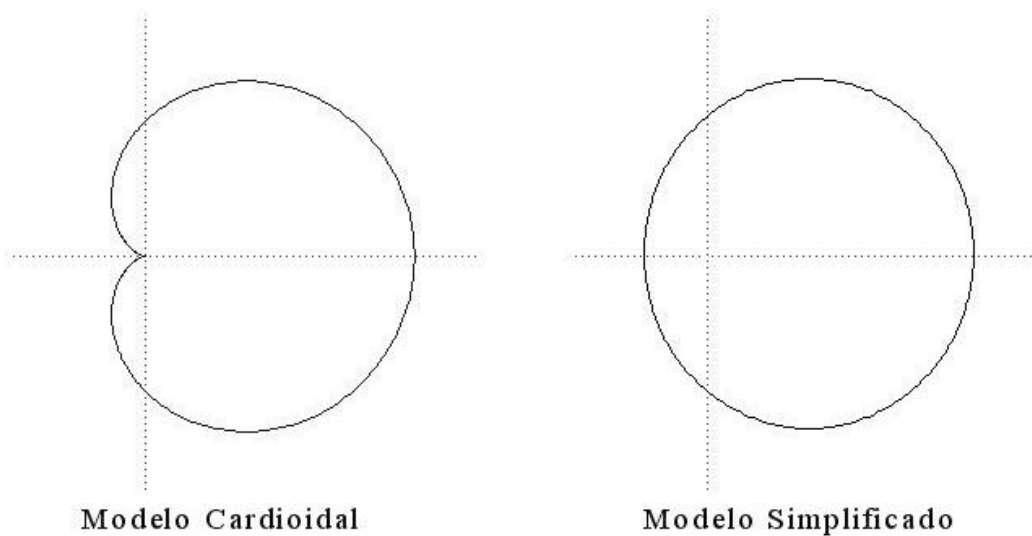


Figura 3. Modelo cardioidal e a simplificação adotada.

A simplificação consiste em utilizar um círculo para representar o campo visual e posicionar o agente não coincidente (afastado de metade do raio) com o centro deste círculo. O raio do círculo define o alcance da visão. Utilizou-se essa simplificação porque a complexidade geométrica da cardióide poderia tornar os cálculos de visibilidade complexos e, com isso, comprometer a performance das implementações. A Figura 4 mostra como o modelo simplificado é construído.

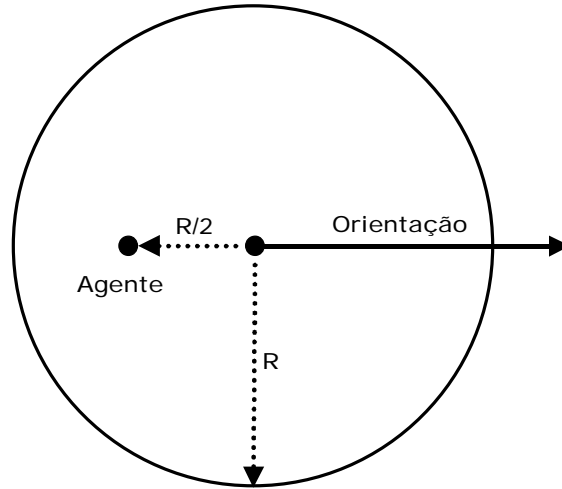


Figura 4. Simplificação do modelo cardioidal.

De um modo geral, o cálculo de visibilidade consiste em determinar quais elementos (agentes ou objetos) estão no interior do campo de visão de cada um dos agentes. Para tanto, calcula-se a distância entre os elementos do ambiente e o centro do campo visual dos agentes. Quando a distância entre um elemento e o centro do campo visual de um agente for menor ou igual ao raio daquele círculo, diz-se que o agente pode ver o elemento. A Figura 5 ilustra o que foi dito. Nesta Figura, verifica-se que o objeto **OBJ2** está visível para o agente, porque a distância **d2** é menor do que o raio do campo visual, enquanto que o objeto **OBJ1** não está visível, porque a distância **d1** é maior que o raio do campo visual.

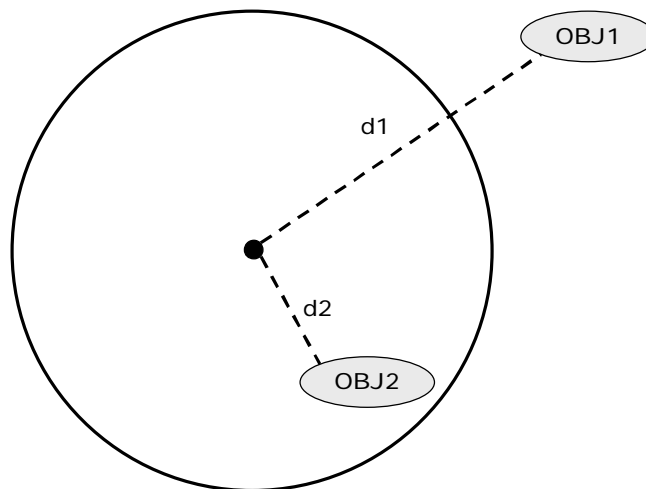


Figura 5. Cálculo de visibilidade.

É importante observar que o centro do círculo é utilizado apenas para calcular a visibilidade. A posição real do agente é determinada deslocando-se, a partir do centro do círculo, ao longo da reta que define a orientação de movimento, até uma posição que está afastada de metade do raio do círculo. Esta observação é necessária para evitar confusão quando houver cálculo de visibilidade entre agentes conforme mostram as Figuras a seguir. Na Figura 6, o agente 1 não está visível para o agente 2. A Figura 7 ilustra o agente 1 visível para o agente 2. É importante salientar que neste ponto do trabalho, ainda não estamos considerando a interferência que o ambiente pode oferecer no cálculo de visibilidade.

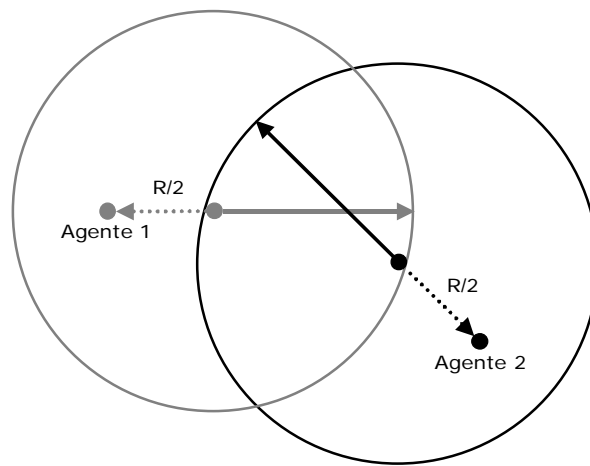


Figura 6. Agentes não estão visíveis entre si.

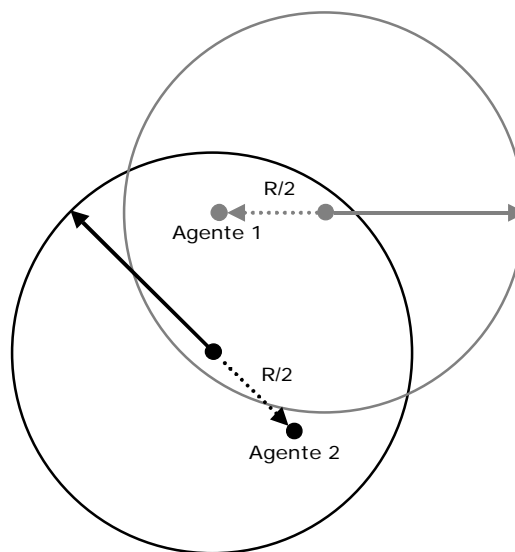


Figura 7. Agente 1 está visível para o Agente 2.

2.1.3 Modelagem Comportamental

O mecanismo de ação autônoma dos agentes é implementado através de comportamentos. Os comportamentos definem como os agentes devem agir e/ou reagir para realizar determinadas tarefas no ambiente. Assim, a modelagem de comportamentos é uma das etapas mais importantes no desenvolvimento de um sistema baseado em agentes. A modelagem de comportamentos consiste na identificação e análise das ações que serão reproduzidas pelos agentes.

Um primeiro estágio desta pesquisa (simular a movimentação de soldados e pedestres) é simplesmente tornar os agentes capazes de se movimentarem por um ambiente. Esta movimentação implica na realização de ações, que permitam ao agente efetuar seu deslocamento desviando-se de objetos e de outros agentes e, ainda, direcionando-se para seus objetivos. Para este fim, utiliza-se uma classe de comportamentos, ditos de manobra (*Steering Behaviors*), cuja finalidade é determinar desvios no movimento dos agentes de modo que seus objetivos possam ser atingidos.

É importante compreender que a modelagem de comportamentos é dependente do fenômeno que estiver sendo simulado. Por exemplo, um modelo de comportamentos para simular a movimentação de soldados dificilmente será adequado para simular o movimento de pedestres.

Entretanto, pode-se definir um conjunto de comportamentos genéricos que podem ser utilizados independentemente do fenômeno sendo simulado. Estes comportamentos genéricos definem ações básicas (tais como: ir até uma determinada localização, seguir um caminho especificado, etc.) e podem ser associados para a criação de outros comportamentos mais complexos e específicos para determinados fenômenos.

2.1.3.1 Comportamentos Genéricos

Em (Reynolds 1999) são apresentados vários comportamentos de manobra com caráter genérico. Os comportamentos de manobra são definidos a partir do cálculo geométrico de um vetor que é somado ao vetor de orientação atual do agente, para produzir uma determinada manobra.

Para ilustrar o que foi dito, a Figura 8 mostra como é calculada a manobra para o comportamento ***Retroceder*** (*Flee*), cuja finalidade é afastar o agente de determinada posição do ambiente. Nesta Figura, pode-se notar um agente, representado por um triângulo, e uma cruz nas proximidades do agente, que representa uma posição no

ambiente do qual o agente deve manter-se afastado. Com isso, afastar-se da posição marcada pela cruz constitui o objetivo do agente, que pode ser representado vetorialmente conforme indicado pelo vetor **Objetivo** (orientado em sentido oposto ao da posição). O sentido de movimento do agente está representado pelo vetor **Orientação Atual**. Assim, o comportamento Retroceder é definido pelo vetor **Manobra**, que ao ser adicionado ao vetor **Orientação Atual**, faz com que o agente mova-se orientado segundo o vetor **Objetivo**.

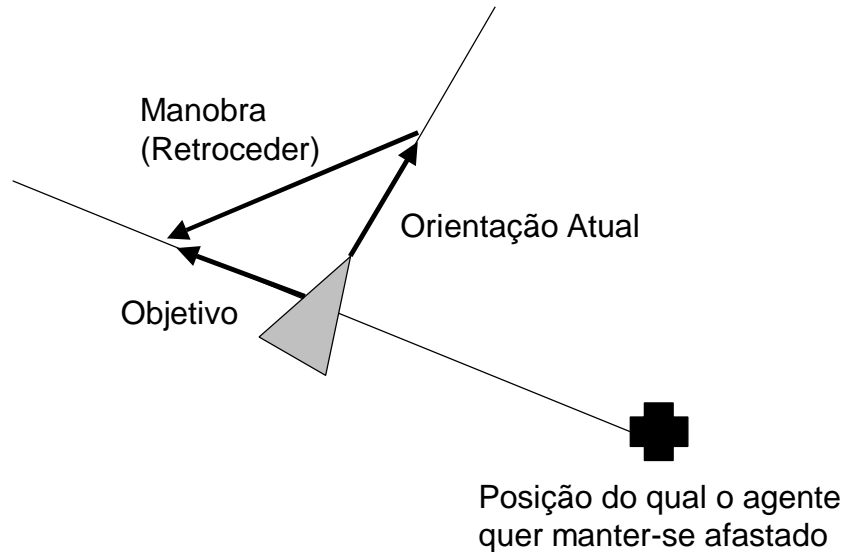


Figura 8. Cálculo do vetor para comportamento *Retroceder*.

Embora Reynolds (1999) proponha vários comportamentos de manobra em seu trabalho, para os propósitos deste trabalho são suficientes os seguintes: **Atingir Posição** (*Seek*), **Retroceder** (*Flee*), **Perseguir** (*Pursuit*), **Seguir Caminho** (*Path Follow*) e **Evitar Colisão** (*Obstacle Avoidance*).

O comportamento **Atingir Posição** determina as manobras necessárias para que o agente atinja uma determinada posição no ambiente. O comportamento **Retroceder**, conforme já foi mencionado, determina as manobras que o agente deve efetuar para afastar-se de uma determinada posição no ambiente. O comportamento **Perseguir** determina as manobras necessárias para que o agente possa perseguir um outro agente. O comportamento **Seguir Caminho** determina as manobras que o agente deve efetuar para deslocar-se segundo um caminho predefinido.

O comportamento **Evitar colisão** requer que uma área retangular seja acoplada ao agente, para detectar se algum obstáculo no ambiente oferece a possibilidade de

colisão. Esta área retangular pode ser interpretada como um mecanismo de percepção específico para o tratamento de colisões. Quando houver a possibilidade de colisão com um obstáculo, calcula-se a manobra necessária para que o agente desvie e evite a colisão. Este desvio é obtido através do vetor que é o inverso da projeção do vetor direcionado para o obstáculo, em um eixo perpendicular à orientação de movimento do agente. A Figura 9 ilustra o que foi dito.

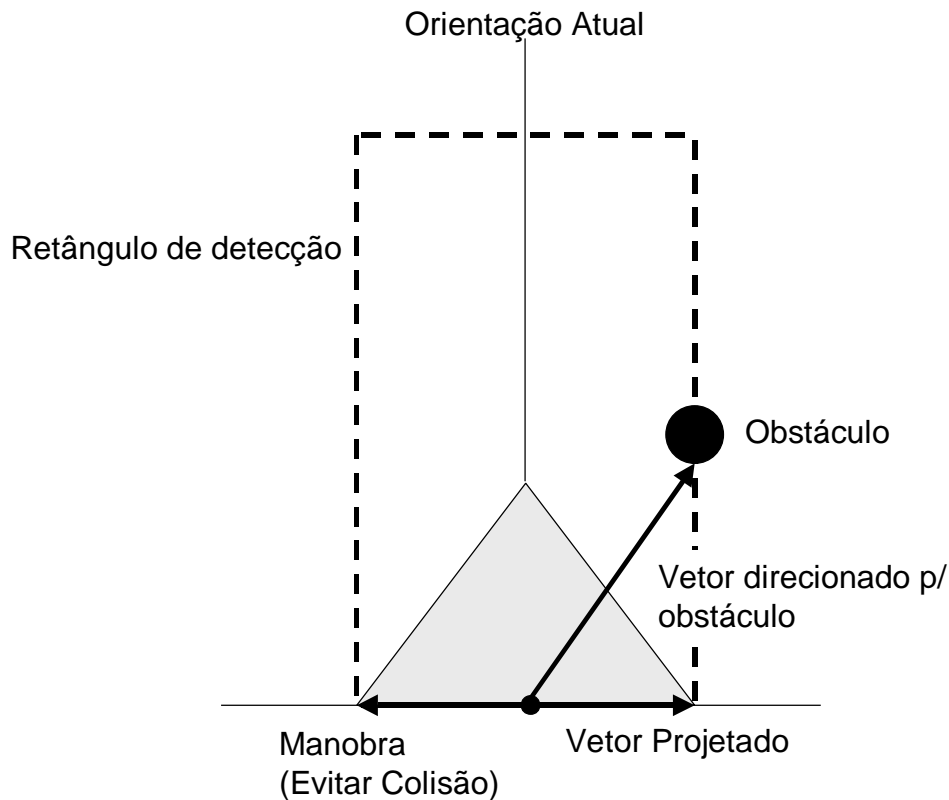


Figura 9. Cálculo do vetor para comportamento *Evitar Colisão*.

Conforme poderá ser verificado no capítulo 5, onde são discutidos os casos abordados, a utilização destes comportamentos facilitou a tarefa de implementação dos comportamentos militares e urbanos.

2.2 Agentes x Autômatos Celulares

Os Autômatos Celulares são modelos matemáticos simplificados que permitem a simulação de alguns sistemas. Eles são constituídos de uma malha, ou reticulado, de células idênticas e discretas, onde cada célula tem um valor associado, ou lista de valores, sobre um conjunto finito, por exemplo, de valores inteiros. Os valores das

células evoluem em intervalos de tempo discretos de acordo com regras determinísticas que especificam os novos valores das células em função dos valores de suas células vizinhas (Aguiar & Costa 2001).

Através da definição de Autômatos Celulares, observa-se que o modelo é dependente de uma representação matricial para o ambiente. Entretanto, conforme será visto no capítulo 3, os dados dos SIGs são predominantemente vetoriais, para uma ampla gama de aplicações, e a representação matricial possui algumas restrições quanto a precisão para representação dos objetos do espaço geográfico.

A simulação da movimentação de pessoas pode apresentar movimentos menos realistas (segundo degraus de escada), caso a matriz que representa o ambiente não possua uma resolução adequada (Therakomen 2001).

Além disso, alguns dos cálculos utilizados na simulação seriam mais complexos de implementar no ambiente matricial do que em um ambiente contínuo. Podemos citar como exemplo, o cálculo de relações topológicas entre os elementos do modelo.

A abordagem por Autômatos Celulares já foi bastante utilizada para a construção de modelos, inclusive para a simulação de pedestres. Em contrapartida, o conceito de Agentes Autônomos é recente e ainda foi pouco explorado para a simulação de muitos fenômenos.

Diante destes fatos, resolveu-se adotar o conceito de agentes, para a construção dos modelos a serem estudados no capítulo 5.

3 Ambiente de Simulação

O ambiente de simulação é o espaço para movimentação e interação dos agentes. É importante lembrar que os agentes, neste trabalho, correspondem as pessoas em uma determinada região geográfica. Assim, a definição do ambiente consiste em selecionar os objetos (naturais, como um rio, e/ou construídos, como uma casa), que sejam relevantes para reproduzir a região geográfica de interesse e para o estudo do fenômeno em questão. Além disso, deve-se especificar uma representação para estes objetos. O objetivo da definição do ambiente é criar um modelo do espaço onde o fenômeno de interesse ocorre.

A seleção dos objetos da região está relacionada com os objetivos da simulação porque os agentes também interagem com eles. Por exemplo, na simulação para estudar a movimentação de pedestres em um centro urbano precisa-se selecionar, no mínimo, a informação sobre as ruas para definir o ambiente onde os agentes irão trafegar. A partir daí, outras informações deverão ser criteriosamente selecionadas, porque um ambiente repleto de objetos desnecessários poderá dificultar a análise dos resultados e reduzir a performance da simulação.

A representação dos objetos selecionados deve levar em consideração as características do modelo de agentes adotado, isto é, os agentes têm de ser capazes de interagir com a representação escolhida. A utilização de uma representação inadequada pode resultar na necessidade de estruturas complexas para armazenar as informações do ambiente, além de exigir alterações na implementação da modelagem dos comportamentos. Em (Reese 1999), são apresentadas algumas observações com relação à importância da representação dos objetos e suas implicações.

O objetivo desta pesquisa é estudar alguns fenômenos antrópicos a partir de uma definição precisa e detalhada do ambiente em que eles ocorrem. Para isso, dados referidos geograficamente, oriundos de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), foram utilizados.

3.1 Ambientes Reais

Embora existam vários estudos de fenômenos antrópicos utilizando sistemas baseados em agentes, ainda são poucos os exemplos que empregam dados reais para definir o ambiente de simulação. Neste contexto, entende-se por dados reais, dados que preservam o posicionamento, comprimento e forma dos objetos da região

geográfica de interesse. Denomina-se ambientes reais à definição do ambiente de simulação utilizando dados reais.

A obtenção de dados reais pode ser feita a partir de levantamento de campo ou de repositórios pré-existentes. O processo de levantamento envolve um alto custo porque requer instrumentos e procedimentos específicos e, além disso, demanda tempo. Por outro lado, a utilização de repositórios pré-existentes requer a decodificação do formato no qual os dados foram armazenados. Como o processo de levantamento foge do escopo deste trabalho, optou-se pela utilização de repositórios pré-existentes de dados reais, mesmo com a restrição do formato de armazenamento.

Desta forma, propõe-se a integração da simulação por agentes com os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) porque estes sistemas operam acoplados a repositórios de dados reais. Segundo Worboys (1995), **SIG é um sistema computacional de informação que permite a captura, armazenamento, manipulação, recuperação, análise e apresentação de dados referidos geograficamente.** Assim como ocorre com o conceito de agentes, existem outras definições para os Sistemas de Informação Geográfica.

Os SIGs constituem um eficiente instrumento para todas as áreas que fazem uso de mapas. O repositório de dados subjacente aos SIGs pode ser entendido como um modelo da região contemplada por aqueles dados. Além disso, para que os dados possam ser armazenados sob os SIGs, eles precisam passar pela etapas de seleção de objetos e representação, tal como requer um ambiente para simulação de agentes. Assim, podemos concluir que os dados de SIGs são plenamente adequados aos dois estudos de caso abordados neste trabalho.

É importante salientar que, no contexto dos SIGs, é mais comum utilizar o termo *feição* para denominar qualquer objeto existente na região de interesse.

3.2 Integração entre Agentes e SIGs

A tarefa de integrar a simulação com dados de SIGs não é trivial. Em (Itami et al 1999), é dito que há essencialmente dois modos para realizar esta integração:

1. Desenvolver o programa de simulação sem a capacidade de carregar diretamente os dados de SIGs e, sempre que precisar destes dados, requisitar ao SIG através de chamadas de funções ou passagem de parâmetros.

2. Desenvolver o programa de simulação com suporte para acesso direto aos dados de SIGs e implementar as ferramentas de SIG, caso seja necessário empregar alguma.

Como os SIGs ainda não possuem uma especificação de interoperabilidade largamente aceita, a primeira opção de integração poderia forçar a utilização de um determinado SIG e, com isso, à limitação dos recursos disponíveis no mesmo.

Assim, adotou-se a segunda opção porque existem alguns formatos de dados que são suportados pela maioria dos SIGs e possuem farta documentação disponível. Para os objetivos deste trabalho, não foi necessário implementar ferramentas para manipulação (consultas alfa-númericas e espaciais, por exemplo) de dados de SIGs. Esta opção aumentou significativamente o tempo necessário para a implementação dos protótipos.

3.3 Modelo do Ambiente

Como mencionado anteriormente, os dados armazenados sob um SIG podem ser considerados como um modelo de determinada região geográfica. Esses dados podem estar representados basicamente nas formas vetorial e matricial. A forma vetorial de representação consiste em uma aproximação poligonal discreta das feições da região enquanto que a forma matricial (também denominada *raster* ou, ainda, *grid*) refere-se a uma representação das feições em uma matriz de células. A Figura 10 mostra as representações vetorial e matricial de uma região.

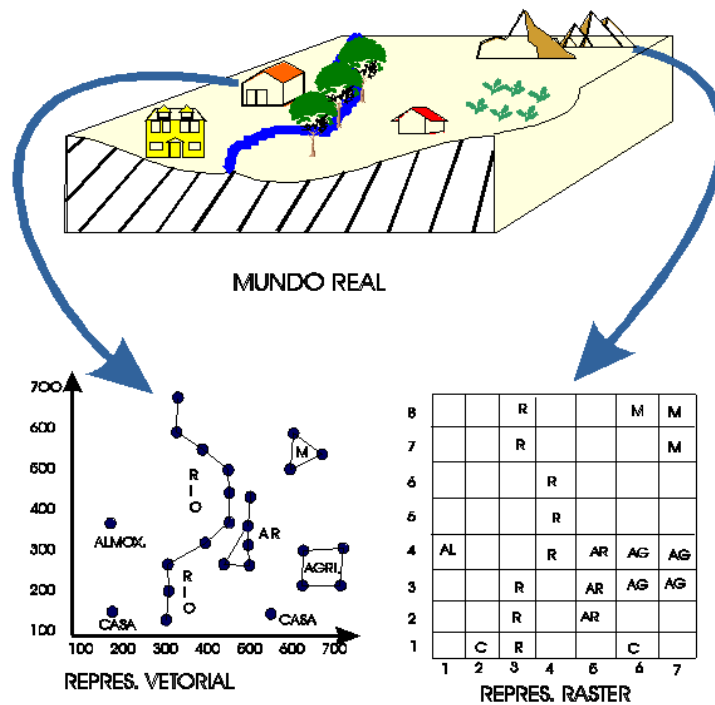


Figura 10. Representações vetorial e matricial.

A comparação entre as representações vetorial e matricial já foi discutida por diversos autores. Basicamente, são abordadas as seguintes características: a capacidade de armazenar grandes volumes de dados, a precisão da representação e a visualização. A forma vetorial é mais compacta, possui boa precisão e apresenta bons resultados na visualização das feições. A forma matricial costuma requerer grandes quantidades de espaço de armazenamento, possui precisão e aparência na visualização dependentes da resolução da matriz.

Embora a forma vetorial pareça ser a melhor representação, deve-se considerar a facilidade de manipulação da representação matricial. Além disso, os SIGs costumam oferecer a possibilidade de conversão de uma representação para a outra (Rosa & Brito 1996).

Desta forma, para fazer um uso eficiente das informações disponíveis nos SIGs, o modelo proposto suporta dados representados na forma vetorial e matricial, ou seja, os agentes são capazes de interagir com os objetos (ou informações) do ambiente de simulação representados na forma vetorial e matricial. Pelos motivos expostos na seção 3.2, optou-se pelos formatos de dados *Arcview Shapefile*, para os dados vetoriais, e *Arcview Binary Grid*, para os dados matriciais.

No capítulo 5, serão apresentadas as informações que foram selecionadas para descrever o ambiente de cada estudo de caso.

4 Arquitetura para Construção dos Protótipos

O estudo de modelos utilizando agentes autônomos nem sempre é realizado por pesquisadores da área da computação. Neste caso, é importante a utilização de ferramentas computacionais que forneçam um ambiente interativo e fácil de usar, onde o pesquisador possa ajustar o *software* para atender às suas necessidades, sem a necessidade de programação de código. Com isso, os pesquisadores podem direcionar seus esforços para o estudo e criação de seus modelos, principalmente para a modelagem comportamental. Segundo Jiang (1999), o *software* StarLogo¹ é um exemplo deste tipo de ferramenta.

No entanto, não foram encontrados exemplos de ferramentas que operassem integradas com dados de SIGs. Desta forma, para implementar os estudos de casos foi necessário desenvolver completamente as ferramentas (na forma de protótipos) que pudessem simular os modelos propostos neste trabalho. Para isso, foi especificada uma arquitetura simplificada para o desenvolvimento de ferramentas (sistemas ou *softwares*) baseadas em agentes.

Diz-se que a arquitetura adotada é simplificada porque não considera algumas questões discutidas na literatura (embora sem consenso), tais como: comunicação entre agentes, mecanismos de memória, adaptabilidade ou aprendizado, etc. Entretanto, esta arquitetura pode ser facilmente expandida para atender a algumas destas questões sem grandes modificações.

A arquitetura de um sistema baseado em agentes define seus componentes e como eles devem estar relacionados, a fim de que os objetivos especificados para o modelo sejam atingidos. Como a arquitetura está intimamente relacionada com o conceito de agentes, foi natural adotar-se uma arquitetura baseada em 3 camadas. As camadas da arquitetura foram assim denominadas: Camada de Ambiente, Camada de Objetivos e Motivação e Camada de Ação. Elas formalizam como os componentes do modelo de agentes (estado interno, percepção e comportamentos) devem atuar durante a simulação. A Figura 11 ilustra a arquitetura adotada.

¹ <http://www.media.mit.edu/starlogo>

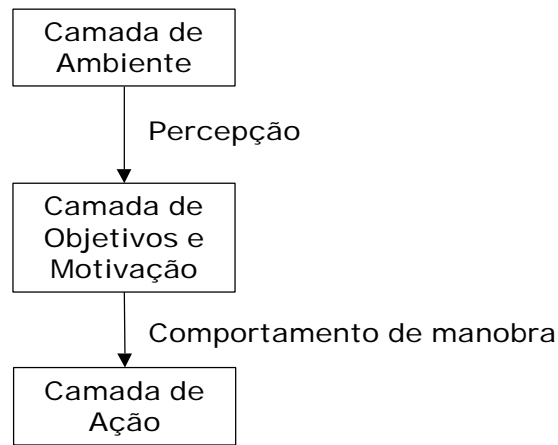


Figura 11. Arquitetura baseada em 3 camadas.

A Camada de Ambiente representa o ambiente de simulação propriamente dito englobando todos os agentes e objetos (em suas representações matricial ou vetorial). Esta camada é consultada no início de cada ciclo da simulação, pelo módulo de percepção, com o objetivo de obter informações da região ao redor dos agentes, que serão utilizadas nas outras camadas para selecionar as ações que serão adotadas. Esta camada pode ser expandida para incorporar um mecanismo para indexação espacial, com a finalidade de acelerar as consultas do módulo de percepção, e/ou um barramento de comunicação, onde os agentes poderiam trocar informações entre eles.

A Camada de Objetivos e Motivação implementa a “inteligência” dos agentes. A finalidade desta camada é analisar as informações obtidas da Camada de Ambiente e, baseado nas motivações e objetivos do estado interno, selecionar o comportamento mais apropriado para o momento. Nesta camada, adota-se o conceito de *situação* para qualquer arranjo de eventos percebidos no ambiente que impliquem na seleção de um determinado comportamento. Por exemplo, um agente ao perceber um obstáculo no ambiente pode decidir por adotar o comportamento **Evitar Colisão**, ou seja, o evento de um obstáculo visível configurou uma *situação*. Entretanto, se o obstáculo percebido não estiver obstruindo a trajetória do agente, ele não precisará adotar o comportamento para evitar uma colisão, ou seja, o mesmo evento de um obstáculo visível não configurou uma *situação*. Nesta camada, poderia-se incorporar mecanismos de memória e adaptabilidade.

A Camada de Ação é responsável pela execução do comportamento selecionado na Camada de Objetivos e Motivação. A forma como os comportamentos serão executados depende das características individuais de movimento (velocidade máxima,

ângulo máximo de giro, etc.) dos agentes. Com isso, dois agentes podem adotar um mesmo comportamento, mas apresentarem efeitos diferentes, devido às suas diferentes características.

A implementação da arquitetura foi bastante facilitada pela correlação entre suas camadas e a estrutura dos agentes (percepção, estado interno e comportamentos). A Figura 12 mostra a arquitetura adotada em uma perspectiva mais próxima da implementação.

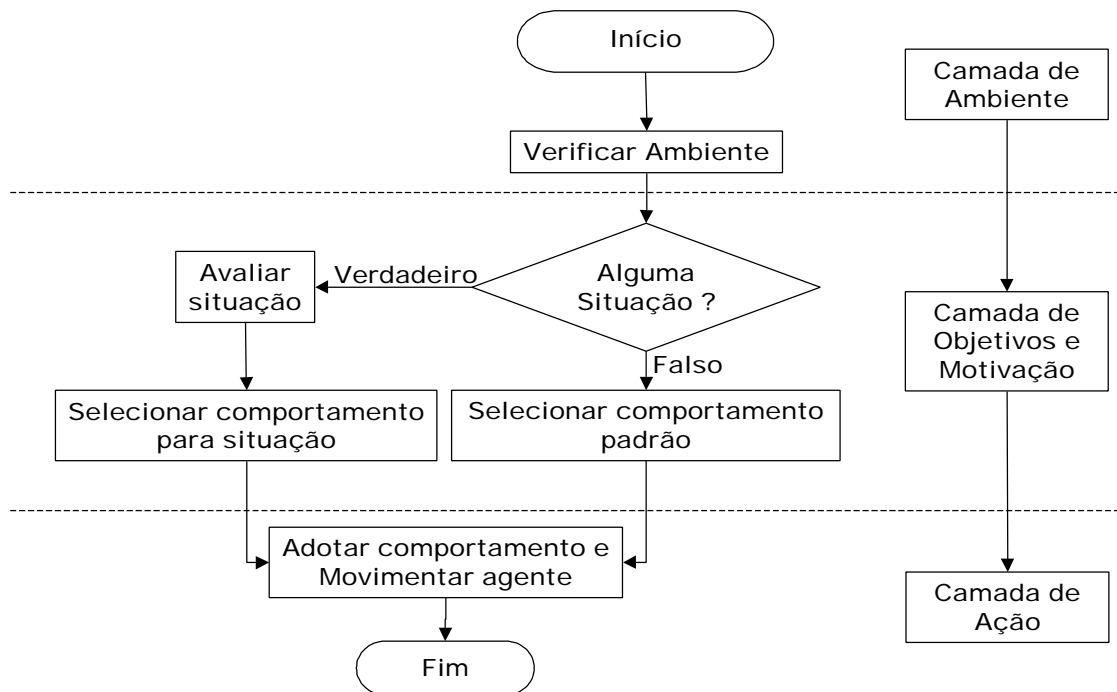


Figura 12. Fluxograma de execução.

O fluxograma da Figura 12 constitui um ciclo de simulação. Assim, sempre que for mencionado o termo “simulação” do modelo ou dos agentes, pretende-se com isso fazer referência a execução ciclo após ciclo deste fluxograma pelos agentes.

Para desenvolver os protótipos dos estudos de casos, utilizou-se a linguagem ANSI C e os pacotes gráficos IUP² e CD³. Além disso, a biblioteca Shapelib⁴ foi utilizada para ler os dados vetoriais no formato *Arcview Shapefile*. Implementou-se, ainda, um leitor(decodificador) para os dados matriciais no formato *Arcview Binary Grid*.

² <http://www.tecgraf.puc-rio.br/iup>

³ <http://www.tecgraf.puc-rio.br/cd>

⁴ <http://gdal.velocet.ca/projects/shapelib>

Para que os protótipos possam utilizar os dados (vetoriais e matriciais) lidos, estes dados devem ser organizados segundo estruturas de dados apropriadas com as operações que serão efetuadas sobre eles. Em geral, a opção por uma determinada estrutura de dados está relacionada com questões de eficiência e performance das aplicações.

Nos protótipos implementados, os dados matriciais foram estruturados internamente na forma de matrizes bidimensionais (de valores do tipo inteiro). A estrutura do tipo matriz é suficiente para um grande número de operações envolvendo *grids* ou imagens. Para os dados vetoriais empregou-se dois tipos de estruturas de dados: lista ligada (*linked list*) e matriz de adjacências. As listas ligadas podem ser entendidas como vetores dinâmicos, ou seja, que podem ter seu comprimento (número de elementos) alterado durante a execução do protótipo. As matrizes de adjacências são estruturas de dados apropriadas para armazenar malhas ou redes de pontos interconectados.

Os dois estudos de casos que serão abordados neste trabalho empregam dados matriciais. Devido a extensão definida para os estudos de caso, somente no caso urbano foi necessário empregar dados vetoriais. Serão apresentados maiores detalhes quanto a natureza dos dados utilizados em cada estudo de caso na seção a seguir.

5 Estudo de Casos

Neste capítulo, serão apresentadas as modelagens de dois casos utilizando os conceitos abordados anteriormente. Os casos foram selecionados em áreas diferentes com o intuito de promover um entendimento mais amplo do processo de modelagem (motivando a modelagem de outros fenômenos) e de tentar a generalização do próprio processo de modelagem.

O primeiro caso apresenta um modelo de tática militar, onde são simulados alguns procedimentos para situações que podem ocorrer durante um confronto. As simulações são comuns no campo militar para testar hipóteses, estimar danos, etc. Entretanto, a utilização de agentes para este fim é recente e ainda pouco explorada. Conforme pode ser visto em (Woodaman 2000), há muitas possibilidades para utilização de agentes no campo militar.

O segundo caso está relacionado com o estudo da dinâmica urbana, ou mais especificamente com o movimento de pedestres. A simulação da dinâmica urbana tem sido estudada com a utilização de Autômatos Celulares mas o conceito de agentes tem apresentado novas perspectivas de estudo. Conforme pode ser visto em (Jiang 1999), (Schelhorn et al 1999) e (Therakomen 2001), este assunto é muito relevante para o entendimento dos processos de formação, uso e alteração dos espaços urbanos.

5.1 Caso Militar

A mobilização real de efetivos para treinamento de táticas e operações costuma ser demorada, desgastante para os militares e com alto custo. Com isso, uma série de soluções baseadas em ambientes virtuais têm sido adotadas para que algumas etapas do treinamento possam ser exaustivamente realizadas em simulações por computador antes que os efetivos sejam levados a campo. Desta forma, planeja-se mais eficientemente o treinamento real e otimiza-se diversos componentes do processo.

As simulações de confronto têm desempenhado um papel relevante no moderno treinamento militar, principalmente para os oficiais que precisam aprender a tomar decisões sob diversas circunstâncias e, ainda, trabalhar com novas tecnologias. Em geral, as simulações são usadas para avaliar a evolução das ações (antecipando possíveis respostas das forças oponentes), o impacto de novas estratégias e o planejamento de contingências (análises do tipo *what-if*) (Ioerger et al 2000).

Para a construção de modelos eficientes, que possam ser utilizados em simulações deste tipo, é necessário levantar uma série de informações de modo que os procedimentos e ações militares possam ser representadas computacionalmente. Para isso, são consultados manuais e/ou documentos pertinentes e ainda programadas entrevistas com oficiais que tenham conhecimento do assunto (*experts*).

Entretanto, a descrição integral dos procedimentos e táticas militares adotados nos treinamentos é de distribuição restrita. Somente militares e pessoas devidamente autorizadas podem ter acesso a estas informações.

Sendo assim, serão abordadas simplificações de alguns procedimentos cuja descrição foram obtidas a partir da colaboração no desenvolvimento do Sistema de Jogos Didáticos para Treinamento de Oficiais do Corpo de Fuzileiros Navais da Marinha do Brasil⁵.

Neste trabalho, o interesse é simular um cenário típico de confrontos militares, onde posições estratégicas de um terreno são disputadas entre dois grupos oponentes. Um grupo, dito de defesa, deve impedir o avanço de outro grupo, dito de ataque, na direção de tais posições. Para isso, serão modelados comportamentos para os grupos, de modo que possam interagir de maneira coerente com os procedimentos militares tomados como referência. Além da modelagem de comportamentos, o modelo que será apresentado também considera a quantificação do poder de combate dos grupos, o cálculo dos danos no engajamento e as características do terreno onde ocorre o confronto. Nas próximas seções serão apresentados os significados destes termos militares e explicado em detalhe como foram abordados no modelo.

5.1.1 Poder de combate

O poder de combate de um elemento é uma estimativa numérica de sua “força”, ou seja, quanto ele representa em termos de poder de fogo no confronto. A estimativa do poder de combate é fundamental para calcular os danos sofridos por um elemento, quando ele é atacado, pois estes dependem da “força” de quem está atacando. Além disso, o conhecimento do poder de combate é uma variável importante nos processos de planejamento estratégico e dimensionamento de elementos de combate.

⁵ <http://www.impa.br/~tron/sjd/>

A formulação do poder de combate envolve inúmeros fatores e motiva pesquisas no campo das simulações militares. Segundo (Seixas & Lauro 2001), o cálculo do poder de combate é uma função das seguintes variáveis:

- Quantidade e alcance dos armamentos
- Letalidade da munição de cada armamento
- Cadência máxima do armamento
- Distância entre o armamento e o inimigo
- Ângulo de incidência do tiro sobre o inimigo

De um modo geral, pode-se imaginar o poder de combate como sendo uma área ao redor do elemento e orientada de acordo com seu movimento, onde as regiões mais próximas e frontais ao deslocamento do elemento sofrem maior influência do armamento que as regiões periféricas afastadas. É comum utilizar o termo projeção do poder de combate para fazer referência ao posicionamento desta área no terreno. Além disso, é importante salientar que a projeção do poder de combate somente terá efeito nos locais visíveis do terreno, ou seja, não obstruídos pelo relevo⁶.

Para ilustrar o que foi dito, a Figura 13 apresenta o poder de combate calculado em (Seixas & Lauro 2001) para uma companhia e um pelotão. As áreas circulares escuras do mapa (ambas orientadas para cima) representam a projeção do poder de combate destes elementos em um terreno e foram posicionadas uma ao lado da outra para facilitar a comparação. Nesta imagem, podemos verificar que o poder de combate de um pelotão (área da esquerda) é menor que o da companhia. Isso ocorre porque o número de soldados e o armamento de uma companhia são superiores ao de um pelotão.

Na Figura 13, pode-se observar que os centros das áreas, que representam a projeção do poder de combate dos elementos, são mais claras do que as bordas. Esta foi a convenção adotada em (Seixas & Lauro 2001) para indicar que quanto mais próximo, o oponente estiver do centro destas áreas, maiores serão os danos sofridos.

⁶ Esta observação é válida porque estamos considerando apenas os disparos efetuados nos inimigos visíveis (tiro tenso). O tiro curvo, onde não é necessário ver o inimigo diretamente para efetuar os disparos, requer comunicação entre os elementos e, por isso, não será abordado neste trabalho.

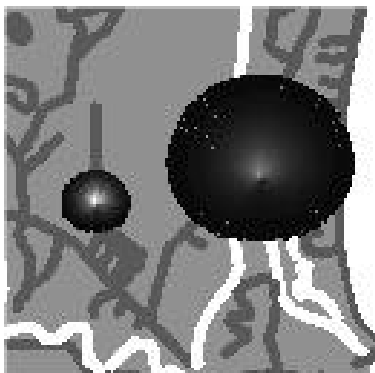


Figura 13. Poder de combate de um pelotão e de uma companhia

Muitas das informações utilizadas pelos simuladores militares, para a formulação do poder de combate em seus modelos, estão na classe de informações reservadas, mencionadas anteriormente. Assim, foi necessário adotar uma simplificação para incorporar-se este conceito ao modelo proposto. Com isso, definiu-se o poder de combate através de uma propriedade numérica cujo valor está diretamente associado com o alcance do armamento dos elementos, ou seja, quanto maior o valor do poder de combate, maior será o alcance do armamento. Para ilustrar o que foi dito, deve-se considerar que um elemento com valor de poder de combate igual a 100, por exemplo, poderá atingir um oponente a 100 metros de afastamento.

Esta definição é similar àquela apresentada para o campo visual do modelo de agentes, pois o campo visual também é definido por um valor numérico que indica o alcance da visão dos agentes. A diferença entre a definição do campo visual e o poder de combate está relacionado com o fato de que o centro da projeção do poder de combate é coincidente com a posição do agente. Como já se sabe, a posição do agente não é coincidente com o centro do círculo que representa o seu campo visual. A Figura 14 mostra um agente com o campo visual (círculo vermelho) e a projeção do poder de combate (círculo branco) representados.

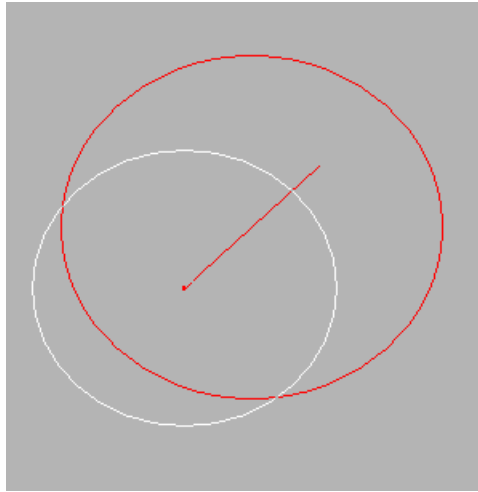


Figura 14. Agente com poder de combate e campo visual.

5.1.2 Engajamento

Quando dois ou mais oponentes trocam disparos, diz-se que houve um engajamento ou atrito. Para que um elemento possa efetuar algum disparo, é necessário que o oponente esteja no alcance da projeção de seu poder de combate. A verificação para determinar se o oponente está no alcance do poder de combate de um elemento é similar àquela que foi descrita para o cálculo da visibilidade.

Adota-se como regra, que os agentes somente efetuam disparos quando os oponentes estão visíveis, ou melhor, os disparos somente são efetuados quando os oponentes estiverem no alcance da projeção do poder de combate e do campo visual. Essa regra é consistente com a situação real, porque os soldados em um confronto não podem desperdiçar munição e, além disso, qualquer disparo indiscriminado pode permitir sua localização pelas forças inimigas. As alterações necessárias para adaptar o mecanismo de percepção dos agentes ao caso militar serão explicadas detalhadamente na seção 5.1.6.2.

No engajamento, os elementos têm seus comportamentos normais alterados. Por exemplo, é comum reduzir, nos modelos, a velocidade dos elementos engajados. Em geral, os elementos de defesa promovem uma redução maior na velocidade do que os elementos de ataque. Isso ocorre porque a defesa necessita de precisão nos tiros, que diminui quando os disparos são efetuados em movimento, para conter o ataque. Uma redução menor, na velocidade do movimento dos elementos de ataque, está associada com a importância de atingir localizações estratégicas e surpreender a defesa.

Considera-se a redução de velocidade no engajamento como de 1/3 da velocidade normal para a defesa e no ataque convencionou-se uma redução de 1/10.

5.1.3 Cálculo dos Danos

Como consequência do engajamento, os elementos podem sofrer danos que precisam ser quantificados para que o comandante possa avaliar as estratégias e tomar decisões. No contexto das simulações de confronto considera-se danos como sendo mortes, avaria de equipamentos ou qualquer estrago causado pelo fogo inimigo que comprometa a eficiência dos elementos de combate ou a execução do planejamento. Há autores que utilizam o termo perdas para referenciar os danos sofridos no engajamento.

A constante avaliação dos danos ocorridos durante a simulação é importante, porque as ações dos elementos estão relacionadas com os seus estados. Por exemplo, um determinado elemento pode decidir (ou receber uma ordem para) retrair de um engajamento quando perceber que os danos sofridos inviabilizam a ação.

Para esta avaliação, são adotados modelos matemáticos denominados cálculo de atrito cuja finalidade é estimar os danos sofridos pelos elementos no engajamento. O modelo teórico para cálculo de atrito mais amplamente utilizado é o modelo de equações diferenciais de Lanchester. As equações de Lanchester permitem estimar quem perde e ganha, o número de sobreviventes de cada lado e a duração do combate (Kiwielewicz 2000).

De um modo geral, as equações de Lanchester estimam a taxa de redução do poder de combate dos elementos a partir de informações do oponente:

$$\frac{dA}{dt} = -b^2B$$

$$\frac{dB}{dt} = -a^2A$$

Nas equações acima, **A** e **B** correspondem ao poder de combate dos elementos e **a** e **b** aos seus coeficientes de eficiência. Os coeficientes de eficiência são obtidos a partir de dados históricos e de campo, e também pertencem à classe de informações

reservadas. Assim, adotou-se um modelo simplificado para quantificar as perdas dos elementos no engajamento.

O modelo simplificado define que os danos de um elemento engajado estão diretamente associados com uma redução de seu poder de combate proporcional à “força” do oponente. Essa redução é definida proporcionalmente pela razão **PCO/PCE**, onde **PCO** representa o poder de combate do oponente e **PCE** é o poder de combate do elemento. Esta formulação permite capturar a diminuição gradual do poder de combate dos elementos engajados em função da relação de “força” entre eles. É importante salientar que **PCO** e **PCE** correspondem aos parâmetros **A** e **B** nas equações de Lanchester.

Embora simplificado, o modelo adotado para cálculo de atrito mostrou-se coerente com alguns parâmetros de referência, tais como: elementos com maior poder de combate eliminam oponentes com menor poder de combate e o tempo de engajamento é determinado pela magnitude da diferença de “forças” entre os elementos, ou seja, quanto maior a diferença de poder de combate, menor será o tempo de engajamento.

A Figura 15 mostra os dados de 2 elementos que entram em engajamento frontal no ciclo 0 da simulação. Da tabela verifica-se que um elemento engaja com um oponente com o dobro de seu poder de combate e, é eliminado entre os ciclos 6 e 7.

Uma questão que é interessante ser abordada neste ponto é a definição da eliminação de um elemento. Alguns autores consideram que um elemento é eliminado da simulação quando seu poder de combate atinge um certo limiar percentual, normalmente entre 10% e 30% do inicial. No modelo proposto, um elemento é considerado eliminado quando seu poder de combate é nulo (ou negativo).

A Figura 16 ilustra a situação de um outro engajamento frontal, onde a diferença no poder de combate dos elementos é menor. Concordando com os parâmetros de referência, verifica-se que o tempo de engajamento é superior.

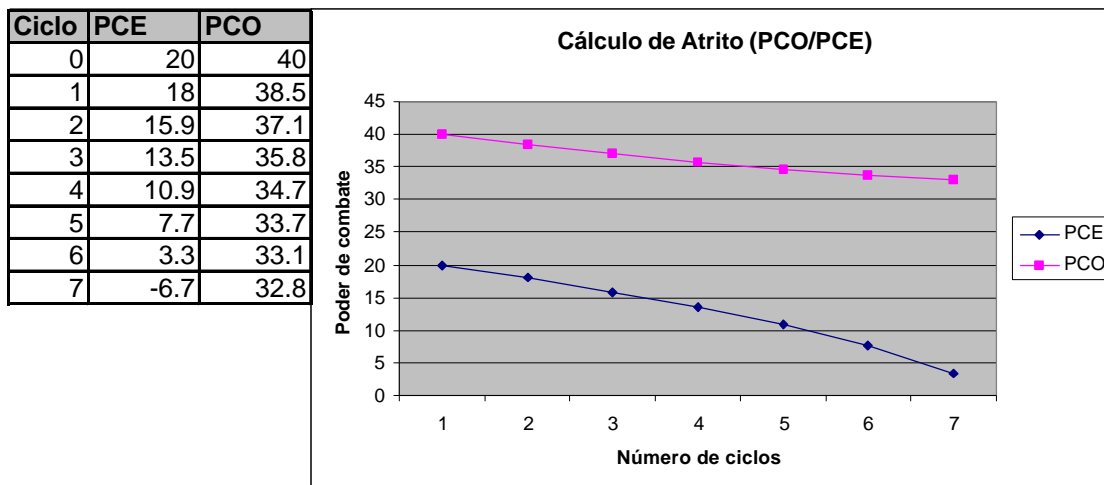


Figura 15. Atrito entre oponentes com grande diferença de poder de combate.

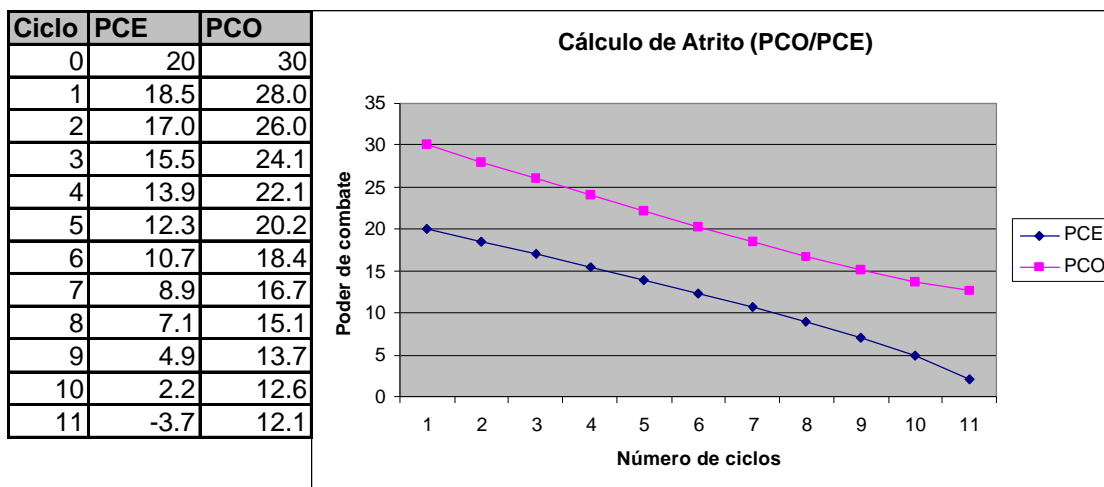


Figura 16. Atrito entre oponentes com pequena diferença de poder de combate.

Não serão abordados neste trabalho os danos derivados de fatores fisiológicos e psicológicos tais como: cansaço, doença, medo, etc. Entretanto, alguns destes tipos de danos poderiam ser incorporados no modelo com poucas alterações. Por exemplo, poder-se-ia modelar o desgaste por cansaço através de um fator de redução do poder de combate, independente de engajamento, e que atuaria ao longo do tempo ou após o deslocamento de determinadas distâncias.

5.1.4 Plano Tático

O treinamento militar tem a finalidade de condicionar os soldados para a execução de determinadas ações e/ou procedimentos mediante as situações prováveis de um

confronto. Sendo assim, tomando como referência dados históricos e de treinamentos, as situações de confronto são sistematizadas, em conjunto com uma série de procedimentos considerados adequados, para definir um plano tático.

A partir da cooperação com o Corpo de Fuzileiros Navais da Marinha do Brasil, foi possível obter um plano tático simplificado para utilização como referência neste estudo. A Figura 17 mostra o plano obtido, com as situações que serão consideradas neste trabalho e as respectivas ações que serão adotadas pelos elementos de combate, de acordo com sua natureza.

Situação	Natureza da Ação	
	Ofensiva	Defensiva
Detecção de Inimigo Sem ser Detectado	Perseguir e Atacar	Congelar e Retroceder
Contato Fortuito	Atacar	Atacar
Emboscada	Perseguir e Atacar	Atacar e Retroceder
Alerta Inimigo	Perseguir e Atacar	Congelar

Figura 17. Plano tático.

É importante observar que o plano tático somente apresenta uma relação das situações e ações correspondentes. Para a construção do modelo, é necessário que cada uma das situações seja descrita com detalhes suficientes que permitam representá-la em um formato computacional adequado para os agentes. Isto é necessário porque os agentes deverão ser capazes de determinar a ocorrência das situações durante a simulação sem intervenção externa, ou seja, somente levando em consideração as informações disponíveis no ambiente e seu estado interno (motivação e objetivos). Na verdade, este plano tático será incorporado à camada de motivação e objetivos da arquitetura porque caracteriza o conhecimento dos agentes e define o processo de

decisões. Sendo assim, serão descritas cada uma das situações consideradas no plano, a saber: emboscada, contato fortuito, detecção de inimigo sem ser detectado e alerta inimigo.

A **emboscada** refere-se a situação em que um elemento é surpreendido pelo ataque inimigo a partir de uma posição que favorece o ataque e dificulta sua fuga. O fator surpresa do ataque corresponde ao fato de não haver indicação da presença do inimigo até o momento do ataque. Os *experts* militares consideram que uma emboscada é um ataque fatal, ou seja, não há possibilidade de escapar. Essa letalidade deve-se ao fato de uma emboscada ser preparada em local adequado para dificultar a reação do elemento e, além disso, utiliza-se armamento específico para a eliminação. Um outro fator importante em uma emboscada é a necessidade de uma ação coordenada de mais de um elemento de combate. Em um confronto, nem sempre há tempo hábil para fazer a preparação que uma emboscada requer. Assim, costuma-se classificar as emboscadas em prevista e imprevista. As emboscadas previstas devem seguir a descrição dada. Já as imprevistas são aquelas efetuadas por elementos de combate sem armamento adequado e sem tempo hábil para efetuar o preparo que a situação ideal requer. Devido ao caráter improvisado da emboscada imprevista, o inimigo tem a possibilidade de escapar. Como não se está considerando questões relativas a cooperação entre agentes neste modelo, somente as emboscadas imprevistas serão abordadas.

O **contato fortuito** ocorre quando elementos oponentes se encontram acidentalmente. Utiliza-se o termo “acidentalmente” porque o encontro dos oponentes se dá em condições (localização, distância, etc.) que não se dariam por operação consciente dos elementos. As causas de contato fortuito geralmente estão associadas com as características do terreno (relevo, vegetação, etc.). Por exemplo, as regiões de mata densa são propícias ao contato fortuito porque dificultam a detecção antecipada do inimigo.

A **detecção de inimigo sem ser detectado** ocorre quando um elemento de combate percebe a presença de oponentes sem ser percebido. Esta situação mostra bem a importância de ocupar os pontos estratégicos do terreno porque conhecendo antecipadamente a localização do inimigo e uma indicação de seu deslocamento pode-se efetuar um planejamento mais eficiente das ações.

A situação de **alerta inimigo** ocorre quando um elemento de combate detecta um elemento amigo engajado ou perseguindo algum oponente. O alerta inimigo se

caracteriza mesmo que o elemento de combate não detecte o inimigo sendo perseguido pelo elemento amigo. É importante observar que embora essa situação sugira uma cooperação entre os agentes, neste trabalho não será considerado desta forma, porque a cooperação supõe algum mecanismo de comunicação (o que não existe na arquitetura utilizada).

Com estas descrições em linguagem natural, a tarefa passa a ser encontrar uma representação computacional. Analisando as descrições das situações verifica-se que há uma série de eventos implícitos (alguns mais evidentes) e que poderiam ser utilizados para caracterizar as situações. Por exemplo, quando se analisa a descrição da situação em que o elemento de combate detecta um inimigo sem ser percebido, verifica-se que esta situação está atrelada ao evento de haver algum inimigo visível e a outro evento, não tão determinístico quanto o primeiro, que indica se o inimigo também pode ver o elemento. Desta forma, é possível caracterizar estas situações utilizando o seguinte conjunto de eventos da simulação:

- Inimigo visível - Este evento indica que há algum oponente visível.
- Elemento visível – Este evento indica se um oponente, que está visível para um elemento de combate, também é capaz de detectá-lo. Este evento é determinado considerando a distância entre os elementos e a orientação do inimigo.
- Inimigo na projeção do poder de combate - Indica que há algum oponente no interior da projeção de poder de combate do elemento.
- Inimigo atacando – Indica que o elemento está sendo atacado. Para determinar este evento, verifica-se a ocorrência da diminuição do poder de combate de um elemento entre ciclos consecutivos da simulação.
- Possibilidade de engajamento – Dado que existe um oponente visível, verifica se há a possibilidade de ocorrer engajamento. Isto é determinado através de uma estimativa do trajeto do oponente, considerando que sua orientação não irá mudar. A Figura 18 ilustra o cálculo deste evento. Podemos verificar que se a distância d , entre o agente 1 e a linha de trajetória do agente 2, for menor que o raio do campo de visão R do agente 2 haverá a possibilidade de engajamento entre os agentes.
- Engajamento pode ser evitado - Este evento está associado com o evento “Possibilidade de Engajamento” e indica que, embora haja a possibilidade de engajamento, o elemento pode retrair sem ser detectado.

- **Alerta Inimigo** – Este evento (com mesmo nome de uma das ações) indica que um elemento amigo foi detectado em perseguição ou engajado.

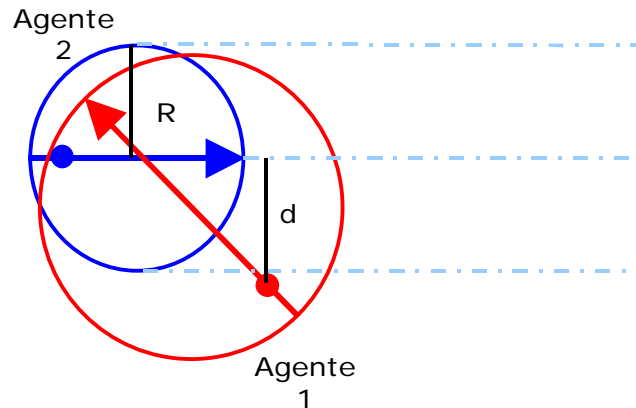


Figura 18. Cálculo do evento “Possibilidade de Engajamento”.

Desta forma, pode-se exprimir a caracterização das situações na forma de um algoritmo, conforme mostra o trecho de pseudocódigo a seguir:

```

SE ( $INIMIGO ATACANDO E NÃO $INIMIGO VISÍVEL ) ENTÃO
    SITUAÇÃO EMBOSCADA
SENÃO SE ( $INIMIGO VISÍVEL E $ELEMENTO VISÍVEL ) ENTÃO
    SITUAÇÃO CONTATO FORTUITO
SENÃO SE ( $INIMIGO VISÍVEL E NÃO $ELEMENTO VISÍVEL ) ENTÃO
    SITUAÇÃO DETECÇÃO DE INIMIGO SEM SER DETECTADO
SENÃO SE ( $ALERTA INIMIGO ) ENTÃO
    SITUAÇÃO ALERTA INIMIGO

```

5.1.4.1 Ocorrência de situações simultâneas

Pelo que foi exposto, percebe-se que não foi prevista a possibilidade de ocorrência de situações simultâneas. Assim, é evidente a necessidade de um critério para lidar com esta possibilidade. Para solucionar este problema, resolveu-se associar um grau de letalidade às situações e, no caso de ocorrências simultâneas, priorizar as mais letais. Uma emboscada, como já foi visto, é uma situação de alto grau de letalidade. Desta forma, quando uma emboscada ocorre simultaneamente com outra situação, ela deve ser priorizada. Em seguida, tem-se o contato fortuito, porque, nesta situação, os oponentes se percebem quando já estão próximos. Com isso, não resta outra

alternativa senão atacar (conforme mostra o plano tático). A próxima situação deve ser aquela em que a patrulha vê mas o inimigo não, porque o elemento pode surpreender o inimigo em um ataque (inclusive planejando uma emboscada). A situação com menor grau de letalidade é o alerta inimigo porque nem sempre o inimigo estará visível e trata-se de uma ação indireta (conjunta). A Figura 19 apresenta a classificação adotada.

Prioridade Alta
Emboscada
Contato Fortuito
Detecção de Inimigo Sem ser Detectado
Alerta Inimigo
Prioridade Baixa

Figura 19. Prioridade das situações.

5.1.5 Modelagem Comportamental

À primeira vista, poder-se-ia concluir que a modelagem comportamental consistirá em implementar comportamentos que simulem as ações do plano. Entretanto, é importante lembrar que o plano somente especifica ações a partir da ocorrência de situações. Em um confronto, pode-se ter períodos sem a ocorrência de situações, em que os elementos de combate executam ações não previstas no plano. Basicamente, são ações de ordem pró-ativa, ou seja, não reativas como as previstas no plano, e relacionadas com os objetivos dos elementos de combate.

Assim, no escopo da modelagem comportamental para o caso militar, observa-se que será necessário implementar comportamentos para simular as ações previstas e não previstas do plano. Uma parcela significativa desta implementação pôde ser feita a partir da associação dos comportamentos de manobra genéricos propostos por

Reynolds (1999). Conforme já havia sido previsto, algumas ações tiveram que ser implementadas completamente por serem muito específicas do caso militar.

5.1.5.1 Ações não previstas no plano (Patrulha)

Percebe-se que os elementos de combate apresentariam um comportamento essencialmente reativo se fossem consideradas apenas as ações do plano na modelagem comportamental.

Esta tendência reativa até poderia ser utilizada como estratégia da defesa mas os elementos de ataque são por natureza pró-ativos, ou seja, eles precisam atingir determinados objetivos independente da presença inimiga. Essa ação pró-ativa dos elementos está relacionada com as estratégias definidas pelos comandantes.

Assim, decidiu-se adotar uma única ação (para fins de simplificação) que todos os elementos de combate devem executar enquanto não for configurada alguma situação do plano tático. Essa ação consiste em efetuar um deslocamento por posições previamente definidas no terreno, tal como uma patrulha. As posições são visitadas sequencialmente da primeira até a última e, quando esta for atingida, o deslocamento é feito na ordem inversa, ou seja, da última posição para a primeira.

Na Figura a seguir, observam-se três posições (círculos 1, 2 e 3), que foram definidas para exemplificar como ocorre a patrulha. A numeração das posições indica a ordem em que elas foram definidas. Assim, o elemento de combate inicia sua patrulha na posição **1** e se desloca até a posição **3**, conforme mostra a Figura 20 (a). Quando a posição **3** for alcançada, o elemento retorna até a posição **1**, conforme mostra a Figura 20 (b). Os elementos de combate permanecem na patrulha até a ocorrência de alguma situação, a partir do qual adotarão as ações apropriadas conforme a especificação do plano tático.

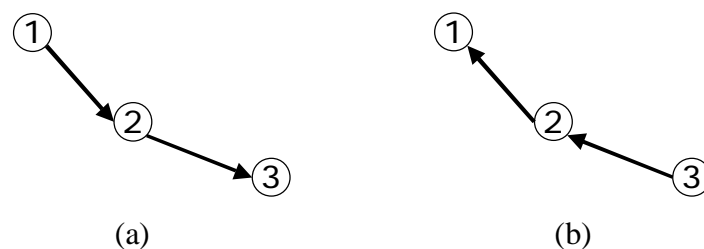


Figura 20. Percurso de Patrulha.

5.1.5.2 Ações do Plano

No plano identificam-se as seguintes ações: **Congelar**, **Retroceder**, **Perseguir** e **Atacar**. À exceção das ações **Congelar** e **Atacar**, verifica-se que as ações **Retroceder** e **Perseguir** já estão implementadas como comportamentos genéricos.

Na verdade, as ações **Congelar** e **Atacar** não são comportamentos de manobra, porque não provocam alteração da orientação dos agentes. A ação **Atacar** consiste em um procedimento que reduz o poder de combate dos elementos durante o engajamento, segundo o cálculo de atrito adotado (**PCO/PCE**). A ação **Congelar** é um procedimento com a finalidade de fazer com que o elemento de combate pare, ou seja, torne sua velocidade nula.

Existem algumas situações do plano que adotam ações isoladas (uma única ação) enquanto outras requerem ações associadas (duas ações). Para as situações que adotam ações isoladas (Contato fortuito e Alerta inimigo) utiliza-se os comportamentos genéricos diretamente. Entretanto, as situações que adotam ações associadas requerem informações adicionais (tais como: critério de transição entre as ações, ordem de execução, etc.) que não constam no plano. Desta forma, relacionou-se a transição entre as ações com os eventos da simulação, já descritos para determinar as situações. O resultado mostrou-se coerente conforme avaliação de alguns *experts* consultados.

Verificou-se que as situações que adotavam ações isoladas (contato fortuito e alerta inimigo) poderiam ficar mais adequadas se fossem associadas com outras. Percebeu-se que as ações isoladas davam um caráter demasiadamente previsível aos agentes. Assim, a partir da análise de algumas simulações, foram feitas algumas alterações (vide diagramas a seguir) nestas ações com bons resultados.

Para apresentar a implementação destes comportamentos, adotou-se o diagrama de máquina de estados ao invés da tradicional notação algorítmica. A utilização de uma notação gráfica possibilita uma compreensão mais clara do relacionamento entre as ações envolvidas.

Nos diagramas apresentados a seguir, os estados correspondem aos comportamentos e as transições são definidas pela ocorrência de eventos. Considerou-se que os elementos sempre iniciam no estado de patrulha. Além disso, foram realizadas ligeiras alterações nos nomes dos eventos para melhor acomodá-los nos diagramas.

Diagrama 1. Comportamento de natureza **ofensiva** para situação “**Deteccção de inimigo sem ser detectado**”

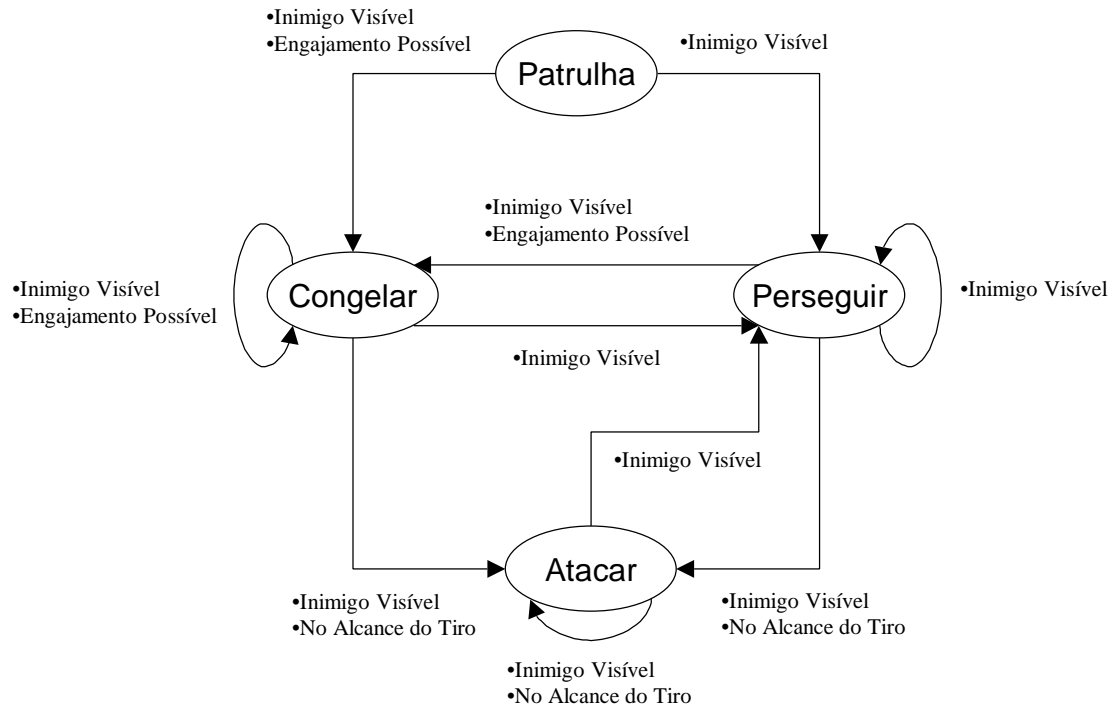


Diagrama 2. Comportamento de natureza **defensiva** para situação “**Deteccção de inimigo sem ser detectado**”

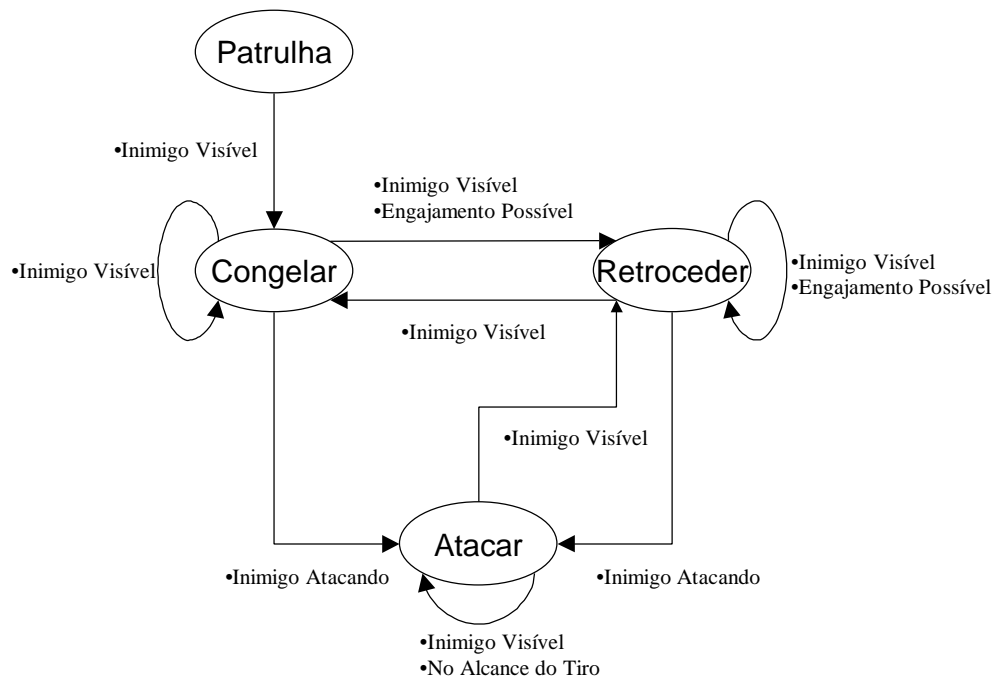


Diagrama 3. Comportamento de natureza **ofensiva** para situação “Contato fortuito”

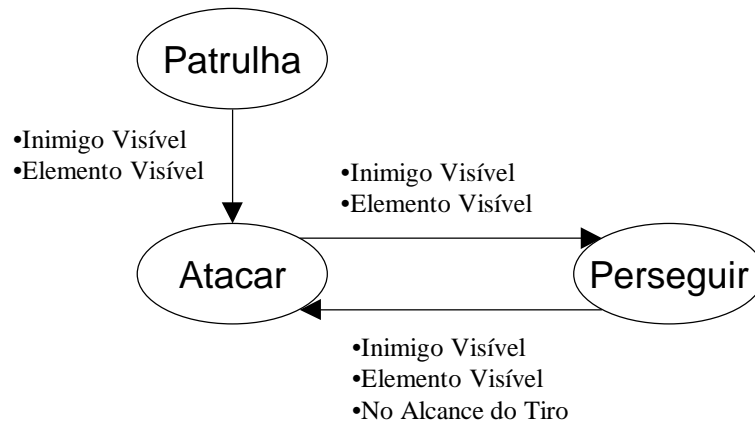


Diagrama 4. Comportamento de natureza **defensiva** para situação “Contato fortuito”

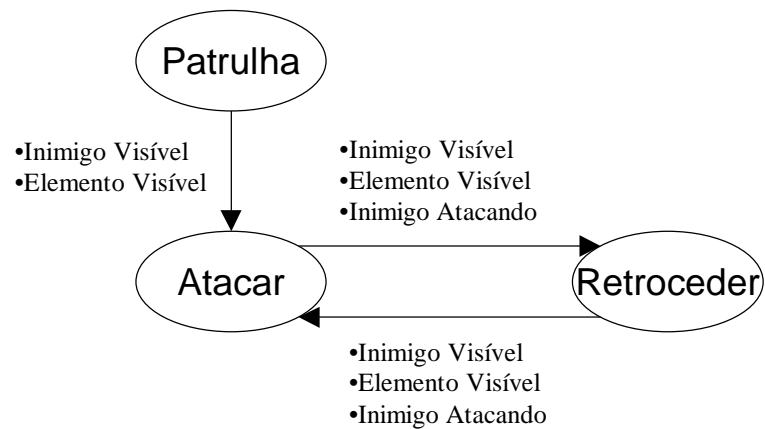


Diagrama 5. Comportamento de natureza **ofensiva** para situação “**Emboscada**”

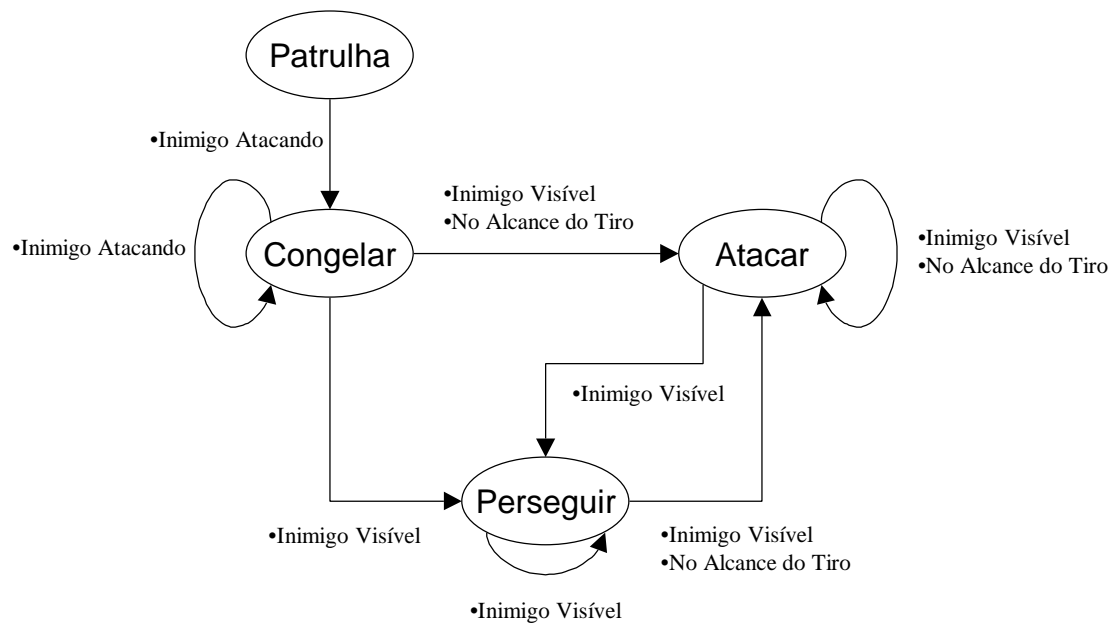


Diagrama 6. Comportamento de natureza **defensiva** para situação “**Emboscada**”

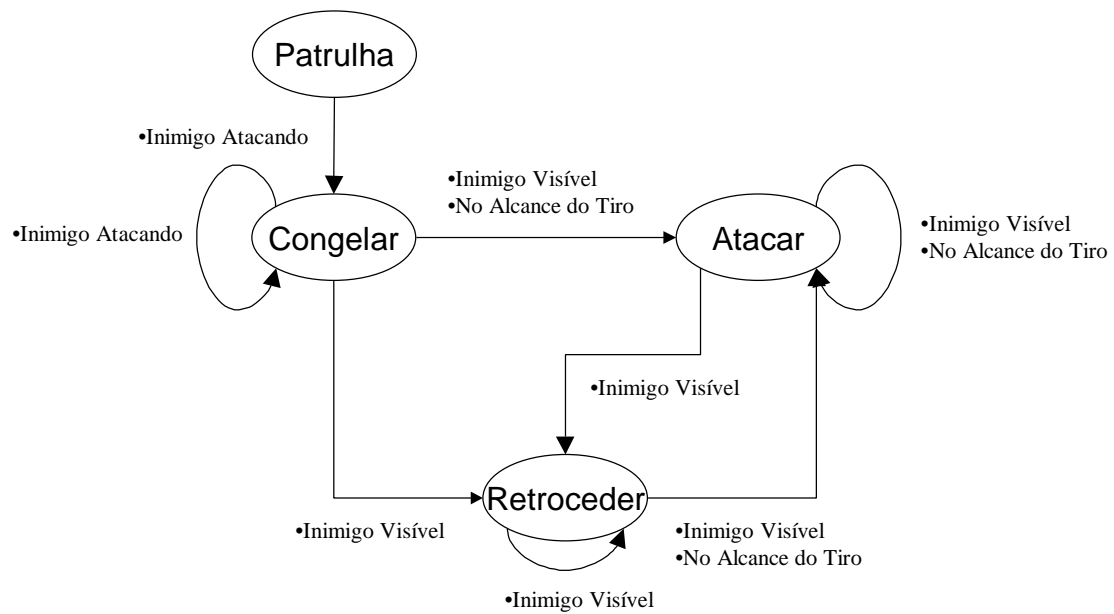


Diagrama 7. Comportamento de natureza **ofensiva** para situação “Alerta de inimigo”

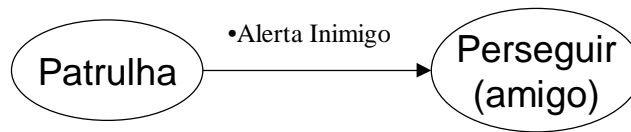
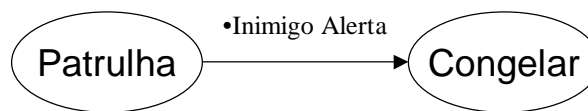


Diagrama 8. Comportamento de natureza **defensiva** para situação “Alerta de inimigo”



5.1.6 Ambiente

A correta consideração da mobilidade e acuidade visual dos elementos de combate é fundamental para a construção de um modelo de confronto realista. Isto se deve ao fato deles estarem relacionados com questões básicas do confronto, ou seja, a movimentação dos elementos pelo terreno e a detecção da presença inimiga. Entretanto, tanto a mobilidade quanto a acuidade visual são influenciadas pelas características (naturais e antrópicas) do terreno.

As características naturais do terreno correspondem às feições da natureza, tais como: topografia, hidrografia, vegetação, uso do solo, etc. As características antrópicas são aquelas resultantes da ação do homem no terreno, tais como: vias, edificações, etc.

Como mencionado anteriormente, a definição do ambiente consiste em incorporar ao modelo as feições do cenário real que sejam relevantes para o fenômeno em estudo. Desta forma, foram selecionadas e representadas as características do terreno que influenciam a mobilidade e a acuidade visual dos elementos de combate.

5.1.6.1 Terreno e Mobilidade

No terreno podem existir feições que são transponíveis e/ou intransponíveis. As feições transponíveis limitam a velocidade dos elementos, mas não os impedem de prosseguir o movimento. Pode-se citar como exemplos de feições transponíveis, os

córregos e vegetação rasteira. Por outro lado, as feições intransponíveis são aquelas que obstruem o movimento dos elementos e precisam ser contornadas. As regiões de vegetação densa ou construções inimigas de contenção (muros) podem ser consideradas como exemplos de feições intransponíveis.

Essas interferências na mobilidade devem ser levadas em consideração durante o planejamento porque podem comprometer as estimativas de tempo e recursos necessários para a ação. Sendo assim, realizam-se levantamentos cartográficos no terreno com o objetivo de localizar as feições que influenciam a mobilidade dos elementos. As informações obtidas nestes levantamentos são combinadas para gerar a “carta de trafegabilidade” do terreno.

A carta de trafegabilidade é um “mapa temático” que representa a possibilidade de uma tropa de natureza específica trafegar por determinada região. As classes temáticas desta carta representam a velocidade máxima que o elemento pode atingir em cada localidade do terreno. Para a confecção desta carta, são combinadas as seguintes informações: modelo digital de elevações, hidrografia, vegetação, uso do solo e vias (Seixas & Lauro 2001).

As Figuras 21 e 22 apresentam respectivamente, um modelo de elevações de um terreno e a carta de trafegabilidade, que para fins de simplificação foi gerada considerando apenas as elevações do terreno. As duas imagens estão em tons de cinza. No modelo de elevações, as áreas mais claras correspondem às maiores alturas. Na carta de trafegabilidade, as áreas mais claras estão associadas com maiores velocidades. Comparando as duas Figuras, nota-se que as regiões mais íngremes (áreas mais claras) no modelo de terreno estão associadas com menores velocidades (áreas mais escuras) na carta de trafegabilidade.

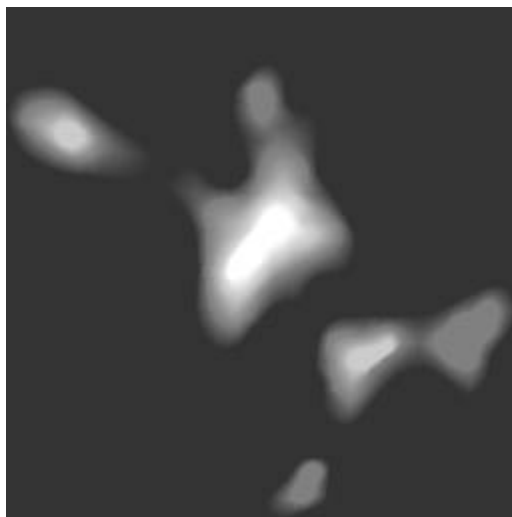


Figura 21. Modelo de Elevações do terreno

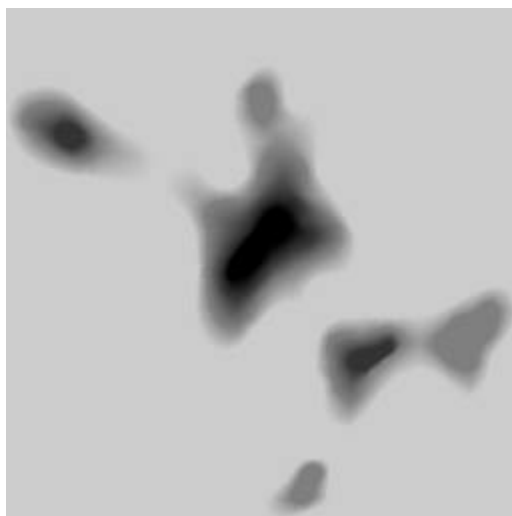


Figura 22. Trafegabilidade do terreno

Desta forma, o modelo proposto requer a carta de trafegabilidade para calcular a velocidade de deslocamento dos elementos de combate. O modelo adotado pressupõe que os elementos sempre tentam se deslocar em sua velocidade máxima (exceto no engajamento). Assim, o cálculo da velocidade consiste em verificar a trafegabilidade na posição do elemento e garantir que a correspondente velocidade não seja excedida.

5.1.6.2 Terreno e Acuidade Visual

Neste trabalho, a acuidade visual de um elemento deve ser entendida como sua capacidade de detectar os inimigos no ambiente. De um modo geral, essa capacidade

de detecção depende da visibilidade dos inimigos, do alcance do campo visual do elemento e das características do terreno.

A visibilidade dos inimigos define o quanto eles são detectáveis e isso é uma função do seu tamanho, da luminosidade no local, das condições do tempo, etc. Isso quer dizer, por exemplo, que é mais fácil detectar um soldado (afastado a alguma distância) durante um dia ensolarado do que em uma noite chuvosa. Considerar o fator visibilidade na acuidade visual é muito útil quando se tem diferentes tipos de elementos de combate na simulação (por exemplo, soldados, blindados, etc). Como neste trabalho objetiva-se a modelagem somente do confronto entre soldados, a visibilidade dos elementos de combate não será um fator de influência para a acuidade visual do modelo proposto.

O alcance do campo visual é uma propriedade do elemento de combate e define uma área, onde os objetos, ali contidos, são visíveis para o elemento. Com isso, a detecção de objetos consistiria em testar se o objeto está no interior ou não desta área. Embora esta seja uma condição necessária para a detecção do inimigo, ela não é suficiente, pois algumas características do terreno poderiam obstruir a linha de visão do elemento até o inimigo.

A maioria dos modelos costuma considerar a vegetação e a topografia como sendo as principais características do terreno que interferem na detecção de elementos. Na verdade, o efeito da vegetação é atenuar a acuidade visual. O grau de atenuação depende do tipo de vegetação em que estiverem localizados os elementos. Sendo assim, faz-se necessário conhecer o fator de atenuação para cada tipo de vegetação do terreno. Este trabalho de classificação dos vários tipos de vegetação e o cálculo do fator de atenuação correspondentes fogem ao escopo deste trabalho. Assim, não será abordado este fator na acuidade visual.

A topografia do terreno pode interferir na detecção entre elementos quando houver alguma elevação, ou mesmo depressão, entre eles. Assim, deve-se adicionar esta condição à detecção de inimigo para torná-la mais adequada. Para isso, utiliza-se um modelo digital de elevações, ou mapa de alturas.

O mapa de alturas de um terreno é um *grid*, onde cada célula armazena o valor da altura (cota) de uma determinada posição no terreno. Com isso, dadas as posições de dois elementos de combate (as alturas associadas às posições são obtidas das células correspondentes no mapa de alturas) utiliza-se um algoritmo que verifica se o

segmento de linha ligando os dois elementos possui algum ponto com altura inferior ao terreno.

A Figura 23 mostra que dois elementos de combate (**A** e **B**) são visíveis se nenhum trecho da linha de visão (em vermelho) entre os elementos tiver altura inferior ao terreno. Por outro lado, a Figura 24 mostra que os elementos não serão visíveis se houver algum trecho da linha de visão (em vermelho) entre os elementos com altura inferior ao terreno (Seixas et al 1999). É importante salientar que o *grid*, nas Figuras 23 e 24, corresponde ao mapa de alturas.

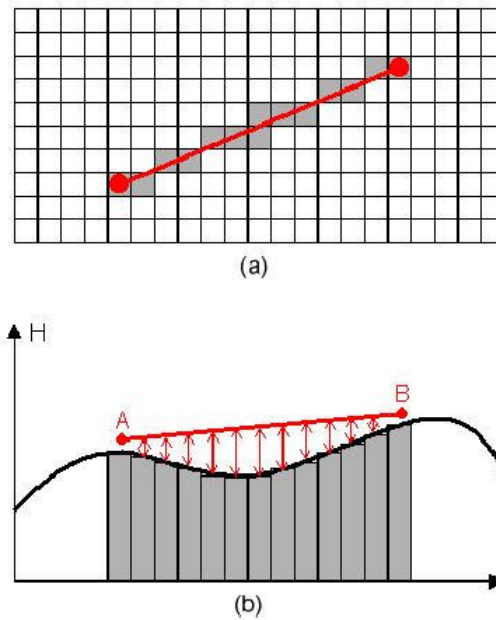


Figura 23. Terreno não obstruiu a linha de visão.

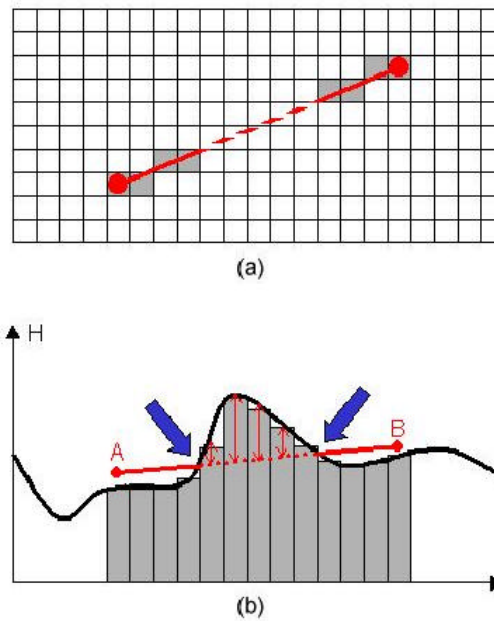


Figura 24. Terreno obstruiu a linha de visão.

Desta forma, o cálculo de visibilidade entre os elementos conta com duas etapas. Uma primeira etapa de filtragem, na qual são selecionados apenas os inimigos no interior do campo visual de um determinado elemento e uma segunda etapa, em que se verifica a existência de obstrução do terreno na linha de visão entre o elemento e os inimigos selecionados.

Sabe-se que em um confronto militar há um desgaste psicológico e fisiológico nos elementos de combate que influencia a acuidade visual. Entretanto, devido a dificuldade para quantificar esta influência, ela não será abordada no modelo.

5.1.7 Protótipo Militar

Com que foi visto, foi possível implementar um protótipo para simular o modelo de movimentação de soldados. Para executar este protótipo, deve-se definir o ambiente de simulação e adicionar os agentes.

O ambiente de simulação é definido através da especificação dos arquivos que contém o modelo de elevações do terreno e a carta de trafegabilidade. Além disso, pode-se fornecer duas imagens ao ambiente de simulação, que podem ser imagens aéreas ou mesmo outras representações para o terreno (uma superfície com sombreamento, como mostra a Figura 25). Durante a simulação, o usuário pode selecionar qual informação do ambiente deve ser apresentada na interface.

A adição dos agentes é feita através da definição interativa dos respectivos trajetos de patrulha. Além disso, deve-se informar as propriedades de cada agente, tais como: tipo do agente (defesa ou ataque), natureza da ação (ofensiva ou defensiva), poder de combate, velocidade máxima, etc. Durante a simulação, pode-se definir novos valores para os parâmetros dos agentes existentes, definir novos agentes ou removê-los.

Existem dois modos para a simulação do modelo: passo a passo e contínuo. No modo passo a passo, o usuário ordena cada ciclo de simulação. No modo contínuo, o usuário define apenas início da simulação, que ocorre ciclo após ciclo, até que se ordene a parada.

Para auxiliar a análise dos comportamentos adotados pelos agentes durante a simulação, o protótipo permite que sejam consultadas/monitoradas as propriedades de qualquer agente.

A Figura 25 mostra a interface do protótipo com alguns agentes posicionados em um ambiente. Os agentes de defesa estão em vermelho enquanto que os agentes de ataque estão em azul. Além disso, pode-se ver uma janela com as propriedades de um determinado agente.

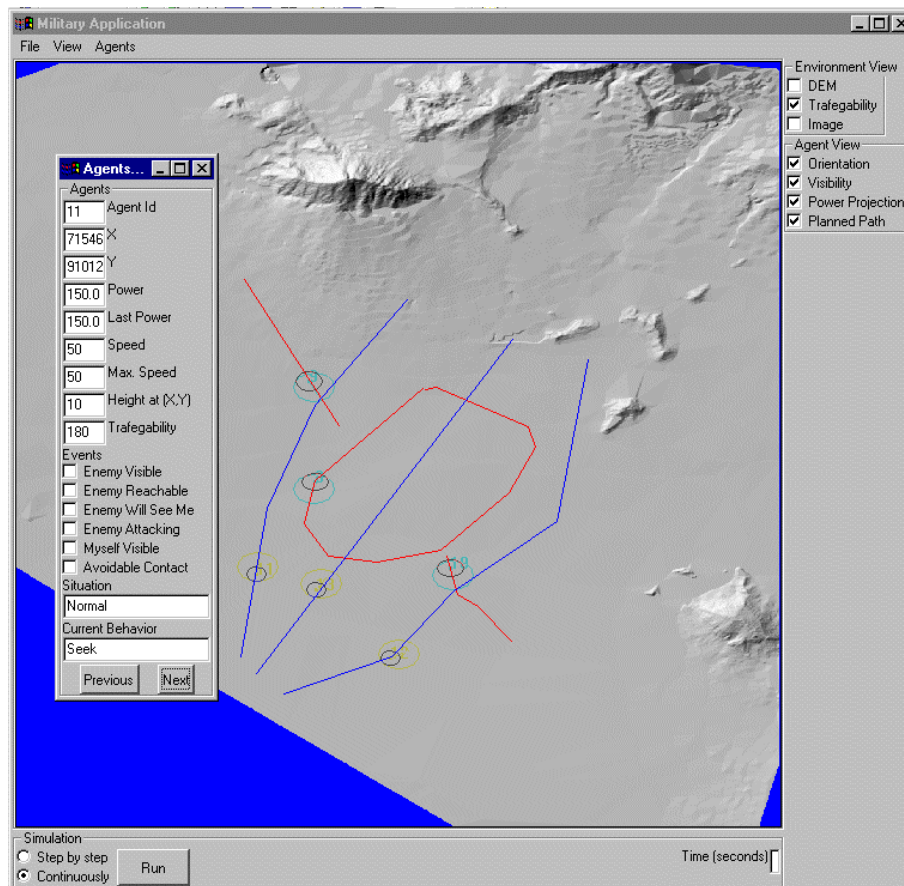


Figura 25. Interface do protótipo.

5.2 Caso Urbano

Existe uma associação entre a movimentação de pedestres e as relações socioeconômicas nos espaços urbanos. Não é por acaso, por exemplo, que os centros comerciais das grandes cidades são também áreas de intenso fluxo de pedestres. Este é um dos motivos pelos quais é importante compreender os fatores que motivam a movimentação de pedestres.

De um modo geral, o estudo da movimentação de pedestres analisa a circulação de pessoas em áreas urbanas e busca identificar as razões que possam explicá-la. Sabe-se que a movimentação de pedestres é influenciada por motivações pessoais, pela configuração espacial e pela localização de atrações. As motivações pessoais dos pedestres estão relacionadas com as atividades que precisam ser desempenhadas e a satisfação de necessidades. A configuração espacial consiste no conjunto de estruturas físicas (ruas, quadras, paredes, etc.) que delimitam o espaço de movimentação dos pedestres. As atrações são lugares do ambiente, onde os pedestres podem atender suas motivações pessoais.

Recentemente, tem havido um interesse pela construção de modelos para investigar a movimentação de pedestres devido ao seu potencial para a estimativa de padrões futuros e teste de hipóteses. Estes estudos podem ser utilizados para, por exemplo: identificar áreas com potencial comercial, avaliar o impacto da urbanização em certas regiões, auxiliar no planejamento de contingências dos serviços de emergência, etc.

Em (Jiang 1999) é apresentado um modelo, denominado SIMPED, com a finalidade de estudar a influência da configuração espacial no movimento dos pedestres. Em (Schelhorn et al 1999) é proposto um modelo de agentes integrado com SIG para a simulação da movimentação de pedestres. Em (Helbing et al 2002) é apresentado um modelo para a simulação de pedestres em condições normais e de emergência. Em (Therakomen 2001) temos um modelo, denominado Mouse.Class, que permite explorar a relação de agentes com vários tipos de ambientes e comportamentos. Embora estes trabalhos apresentem resultados interessantes, ainda são poucos os estudos de modelagem de pedestres utilizando agentes autônomos, principalmente integrados com dados reais georeferenciados, ou seja, ambiente reais.

Neste estudo de caso, o interesse é simular a movimentação de pedestres em um ambiente urbano, representado a partir de dados reais georeferenciados de SIGs. Para isso, serão modelados comportamentos baseados em características empíricas

mencionadas na literatura. Os agentes deverão ser capazes de evitar colisões e atender as suas necessidades individuais. Além disso, será apresentada uma abordagem simplificada para investigar a relação entre o movimento de pedestres e a localização de atrações. Considera-se, a exemplo do que ocorre em alguns centros urbanos, que as ruas são para tráfego exclusivo de pedestres.

5.2.1 Características do Movimento de Pedestres

Tradicionalmente, os estudos da movimentação de pedestres são baseados na observação direta ou análise de fotografias e filmagens. A observação direta consiste na presença de pesquisadores entre os pedestres ou posicionados com visão privilegiada, para efetuar contagens e o registro das ações adotadas pelas pessoas. A análise de fotografias e filmagens registra a movimentação dos pedestres em filmes para análise posterior, podendo contar com mais recursos tecnológicos.

Estas observações indicam a ocorrência de alguns padrões, que são adotados regularmente pelos pedestres quando estão circulando pelos centros urbanos, e que podem ser utilizados para caracterizar a sua movimentação. Desta forma, a construção do modelo apresentado nesta dissertação baseou-se em alguns destes padrões, particularmente aqueles comuns aos trabalhos de (Helbing et al 2002) e (Feurtey 2000). São eles:

1. Os pedestres procuram manter um afastamento entre si e das paredes durante o trajeto.
2. Há uma resistência em adotar uma direção contrária à planejada (*detour*).
3. Os locais, onde os pedestres se deslocam em sentidos opostos, costumam apresentar a formação de filas de pedestres com a mesma orientação.

5.2.1.1 Área de Conforto

O espaço que os pedestres tentam preservar ao seu redor durante o movimento é denominado área de conforto. De um modo geral, considera-se que a extensão desta área é influenciada pelas condições do ambiente, o grau de intimidade com os pedestres vizinhos e aspectos culturais.

Assim, quando a concentração de pedestres no ambiente está alta, a área de conforto dos pedestres é reduzida porque há pouco espaço livre, ou seja, a aproximação e o contato com outros pedestres tem que ser tolerado. Em ambientes com baixa concentração de pedestres, a área de conforto costuma ser maior porque há mais

espaço disponível e, com isso, os pedestres tendem a se distribuir uniformemente pela área.

O grau de intimidade entre os pedestres influencia na área de conforto de modo que quanto maior for o grau de intimidade, menor será a extensão da área de conforto. A seguir, reproduzimos a tabela apresentada em (Feurtey 2000) com estimativas da extensão da área de conforto em função do grau de intimidade.

Relacionamento	Área por pessoa (m ²)
Íntimo	< 0.3
Pessoal	Entre 0.3 e 1.2
Social	Entre 1.2 e 10
Público	> 10

O conceito de área de conforto foi adicionado ao estado interno do modelo de agentes através de uma propriedade numérica cujo valor indica o raio desta área. A Figura 26 mostra um agente com seu campo visual (círculo vermelho) e a área de conforto (círculo branco) representados.

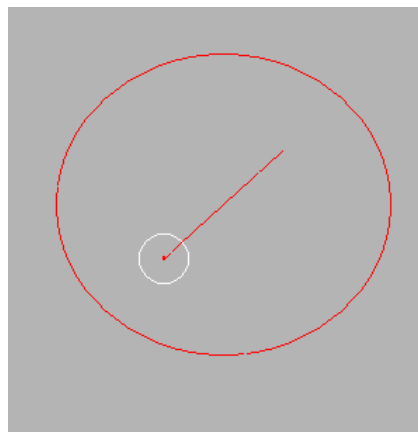


Figura 26. Agente com sua área de conforto e campo visual.

5.2.1.2 Resistência para tomar direção oposta

As observações indicam que os pedestres apresentam uma resistência em adotar uma direção oposta à planejada, inclusive para evitar possíveis colisões com outros pedestres, ou quando o caminho está bloqueado.

No caso de colisões, os pedestres costumam adotar desvios laterais associados com variação da velocidade inclusive parando momentaneamente, para dar à passagem a outros pedestres. Variando sua velocidade, um pedestre pode antecipar-se do ponto em que sua trajetória cruzaria (colisão) a de outros ou, ainda, pode deixar que os outros pedestres, que estejam em sua trajetória, se antecipem do provável ponto de colisão.

Esta característica foi considerada para a modelagem do comportamento, a fim de evitar colisões. Os detalhes serão apresentados na seção de modelagem de comportamentos.

5.2.1.3 Formação de Filas

Em áreas com alta concentração de pedestres e sem um sentido preferencial para deslocamento, ocorre uma “mistura” dos pedestres que se deslocam em sentidos opostos e pode ocorrer a formação de filas de pedestres com a mesma orientação. Na Figura 27, observa-se uma área com vários pedestres deslocando-se em sentidos opostos e a ocorrência de uma fila.



Figura 27. Formação de filas.

Em função da proximidade entre os pedestres que se movimentam em sentidos opostos, estas filas são instáveis e não permanecem por distâncias longas. No entanto,

o processo de formação de filas é contínuo, enquanto a densidade de pedestres na área se mantiver alta.

Em (Helbing et al 2002), é dito que a interpretação convencional destas filas é dada por uma tendência que os pedestres possuem de adotar um lado preferencial para cada sentido de deslocamento (tal como ocorre no trânsito de veículos). Isto é explicado devido aos pequenos desvios laterais que os pedestres fazem para evitar possíveis colisões. Com isso, este movimento lateral tende a separar os fluxos de pedestres com orientação oposta, vide Figura 28.



Figura 28. Formação de faixas preferenciais.

A característica de formação de filas não foi formulada explicitamente no modelo proposto, no entanto, pôde ser verificada como um efeito resultante da interação entre os agentes. Esta constatação reforça a validade da abordagem descentralizada.

5.2.2 Fatores que Influenciam o Movimento de Pedestres

As referências bibliográficas que tratam de modelos de pedestres indicam que sua movimentação é influenciada por motivações pessoais, pela configuração espacial e pela localização de atrações. Conforme já foi mencionado, as motivações dos pedestres estão relacionadas com suas atividades e necessidades enquanto que a

configuração espacial consiste no conjunto de estruturas físicas (ruas, quadras, prédios, etc.) que delimitam o espaço de movimentação dos pedestres. As atrações são lugares do ambiente onde os pedestres podem atender suas motivações pessoais.

Neste trabalho o objetivo principal é simular a movimentação dos pedestres em função das motivações pessoais e da localização de atrações. Assim, a seguir será explicado como estes fatores foram inseridos no modelo proposto. A configuração espacial será discutida na seção 5.2.5, que trata da definição do ambiente de simulação.

5.2.2.1 Atividades e Necessidades

De um modo geral, pode-se afirmar que as pessoas planejam seus caminhos em função dos locais onde suas atividades e necessidades possam ser atendidas, ou seja, a tupla <atividade, necessidade> define o destino dos pedestres no espaço urbano.

Como não se sabe exatamente os destinos de todos os pedestres para abastecer um modelo, alguns autores sugerem que se pode utilizar estimativas geradas a partir de levantamentos das demandas mais significativas (por exemplo, dados censitários regionais) e da localização dos respectivos pontos de oferta na região. As demandas consistem nas atividades e necessidades das pessoas, como por exemplo: trabalhar, estudar, recreação e alimentação. Os pontos de oferta são os locais no ambiente que podem atender às atividades e necessidades das pessoas, tais como: indústrias, lojas comerciais, escolas, teatros e restaurantes.

Como se constata, há inúmeras possibilidades de atividades e necessidades que as pessoas podem buscar nos espaços urbanos, todavia seria complexo abordar todas no modelo.

No entanto, isolando-se pelo menos uma destas atividades/necessidades e modelando-a adequadamente, pode-se posteriormente expandir o modelo adicionando outras atividades/necessidades. Isso inclusive pode facilitar a investigação da influência que uma determinada atividade/necessidade exerce na movimentação dos pedestres. Assim, assume-se que o pedestre no modelo possui apenas um tipo de necessidade. Para representá-la, adicionou-se algumas propriedades numéricas ao modelo com valores percentuais entre 0 e 100%. A seguir, apresentam-se as propriedades acompanhadas de sua descrição.

Propriedade	Descrição
Nível Normal	Armazena o valor de referência para indicar que o agente está satisfeito (sem necessidade).
Nível Atual	Armazena o valor que indica o nível atual de necessidade do agente.
Limiar	Armazena o valor limite para indicar se o agente está satisfeito.
Taxa de Redução	Armazena o valor que será subtraído da propriedade Nível Atual após cada ciclo de simulação.

Inicialmente, a propriedade **Nível Atual** possui o mesmo valor que **Nível Normal**, ou seja, no início da simulação os agentes estão sem necessidades para satisfazer. Após cada ciclo da simulação, a propriedade **Nível Atual** é subtraída do valor armazenado em **Taxa de Redução**. A finalidade da propriedade **Taxa de Redução** é simular o desgaste do agente ao longo do tempo. Quando o valor de **Nível Atual** for igual ao valor de **Limiar**, o agente deverá buscar um ponto de oferta, no ambiente, para satisfazer sua necessidade.

O fato do agente procurar por atrações somente quando “perceber” que precisa suprir uma necessidade é útil para simular as atividades/necessidades que ocorrem em determinados períodos do dia, tais como: a busca por restaurantes no horário de almoço ou pelos pontos de transporte nos horários de início e final do dia de trabalho.

5.2.2.2 Atrações

Os pontos de oferta, mencionados na seção anterior, são denominados atrações e influenciam na movimentação dos pedestres devido à relação direta com suas <atividades,necessidades>. De um modo geral, as atrações de uma região constituem os possíveis destinos dos pedestres nos centros urbanos. É por este motivo que nos centros comerciais (aglomerado de atrações) costuma haver um maior fluxo de pessoas do que nas regiões periféricas das grandes cidades.

Como o modelo considera apenas um tipo de necessidade e como afirmou-se anteriormente que as atrações estão diretamente associadas com as necessidades, o modelo admitirá apenas um tipo de atração. As atrações (todas do mesmo tipo) farão parte das informações do ambiente de simulação e estarão disponíveis na camada de ambiente. Além de possuir uma localização no ambiente, associou-se algumas propriedades às atrações para que ficassem coerentes com as simplificações adotadas

para as necessidades dos agentes. A seguir, apresentamos as propriedades acompanhadas da descrição.

Propriedade	Descrição
Capacidade de Atendimento	Número máximo de agentes que a atração pode atender simultaneamente.
Capacidade de Espera	Número máximo de agentes que podem aguardar por atendimento na atração (fila de espera).
Atendimento Atual	Número atual de agentes sendo atendidos na atração.
Espera Atual	Número atual de agentes aguardando na atração para serem atendidos.
Tempo de Atendimento	Número de ciclos da simulação necessários para a atração satisfazer o agente.

Apesar do modelo suportar várias atrações no ambiente de simulação, adotou-se como exemplo um ambiente com apenas uma atração para facilitar o entendimento de como estas atrações podem atender às necessidades dos agentes. Inicialmente, os agentes estão satisfeitos (sem necessidade) e as propriedades **Atendimento Atual** e **Espera Atual** da atração terão o valor zero. A propriedade **Capacidade de Atendimento** deverá ser inicializada com o número de agentes que a atração pode atender; a propriedade **Capacidade de Espera**, com o número de agentes que podem esperar pelo atendimento da atração e a propriedade **Tempo de Atendimento**, com o número de ciclos que a atração necessita para receber um agente com necessidade e retorná-lo ao ambiente com satisfação plena.

A medida que, na atração chegam agentes com necessidade, a propriedade **Atendimento Atual** é incrementada. Quando **Atendimento Atual** atinge o valor armazenado em **Capacidade de Atendimento**, isto indica que os agentes não podem ser atendidos imediatamente e devem aguardar pelo atendimento. Neste caso, a propriedade **Espera Atual** começa a ser incrementada, para registrar os agentes que estão aguardando pelo atendimento, ou seja, na fila de espera. Quando **Espera Atual** atinge o valor armazenado em **Capacidade de Espera**, isto indica que a atração não tem como atender mais agentes e nem mesmo pode permitir que aguardem na atração, com isso, eles precisam procurar por outra atração que possa atendê-los.

Com o decorrer da simulação, os agentes que permaneceram sendo atendidos (não confundir com a fila de espera) por um número de ciclos igual ao valor da propriedade **Tempo de Atendimento**, retornam para o ambiente e continuam sua movimentação. A propriedade **Atendimento Atual** é decrementada do número de agentes que retornam ao ambiente após terem sido atendidos pela atração. Com isso, são disponibilizadas vagas para atender os agentes que estão na fila de espera, se houverem alguns, ou ainda, agentes no ambiente. Se houverem agentes na lista de espera, **Espera Atual** é decrementado do número de vagas disponibilizadas no atendimento e **Atendimento Atual** incrementada de igual número, sem permitir que o valor ultrapasse **Capacidade de Atendimento**.

Embora o modelo considere que as atrações são do mesmo tipo, verifica-se que alterando os valores das propriedades (**Capacidade de Atendimento**, **Capacidade de Espera** e **Tempo de Atendimento**) essa restrição pode ser facilmente derrubada. Com isso, poder-se-ia fazer com que as atrações com maior capacidade de atendimento ou menor tempo de atendimento fossem preferidas em oposição às outras.

5.2.2.3 Área de Influência das Atrações

Em um cenário real, onde são válidas as teorias de livre concorrência, uma atração comercial atrai mais pedestres do que outras. Para isso, utiliza recursos tais como: redução de preços e maior variedade de ofertas. Desta forma, há uma diferenciação nas atrações que pode ser utilizada para determinar qual das ofertas disponíveis está mais compatível com o perfil de determinado pedestre.

Entretanto, considerou-se simplificada, apenas atrações de mesmo tipo e mesmas propriedades. Com isso, torna-se necessário determinar algum critério que os agentes possam utilizar para escolher uma atração. Adotou-se uma abordagem na qual os agentes dão preferência às atrações mais próximas. Isto é razoável visto que todas as atrações são equivalentes. Esta abordagem fundamenta-se nas teorias do *Geomarketing*.

Segundo as teorias do campo do *Geomarketing*, descreve-se a interação entre pedestres e atrações com a utilização de modelos gravitacionais. Estes modelos, baseados na teoria da força gravitacional de Newton, mostram que a influência que uma atração exerce sobre um consumidor é diretamente proporcional às ofertas da atração e inversamente proporcional à distância entre eles (Aranha & Figoli 2001).

Com isso, aplicando-se o modelo gravitacional a um conjunto de atrações pode-se determinar as áreas que são influenciadas por cada uma delas. Definiu-se a área de influência de uma atração como sendo uma região (em torno da atração) que garante que qualquer posição, no interior desta região, está mais próximo daquela atração. Assim, dada a localização de um pedestre, pode-se determinar qual atração está mais próxima. Determinando as áreas de influência para cada atração, a região em estudo será segmentada, permitindo assim a visualização da influência de cada atração. Este tipo de trabalho é feito pelos analistas de Geomarketing para avaliar a participação de um empreendimento em relação aos seus concorrentes, para definir localizações com potencial comercial para instalação de filiais ou novos empreendimentos, para simulação de cenários e previsão de vendas.

Para definir as áreas de influência das atrações do modelo, partiu-se do conceito do Diagrama de Voronoi. Um Diagrama de Voronoi define, para um conjunto de pontos, regiões em torno destes pontos de modo que qualquer localização no interior de uma determinada região está mais próxima do ponto que gerou aquela região (Figueiredo & Carvalho 1991).

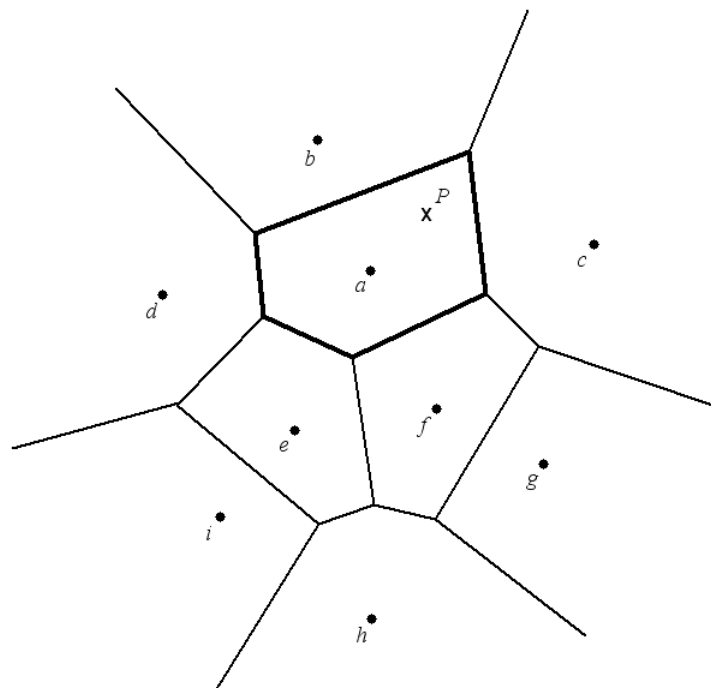


Figura 29. Diagrama de Voronoi.

A Figura 29 mostra a configuração de um Diagrama de Voronoi para um conjunto de pontos (*a, b, c, d, e, f, g, h e i*), onde podemos observar que a posição *P* está na região gerada em torno do ponto *a*, logo a posição *P* está mais próxima do ponto *a*.

Em geral, os algoritmos geram o Diagrama de Voronoi em uma representação poligonal, ou seja, determinam os polígonos que delimitam as áreas de influência. Esta representação oferece uma diminuição na performance da simulação porque, como não estamos utilizando mecanismos para indexação espacial, é necessário verificar a pertinência da localização de cada agente com cada um dos polígonos das áreas de influência. O ideal é utilizarmos uma representação matricial (*grid*) para as áreas de influência porque a condição de pertinência pode ser calculada com menor custo, simplesmente considerando as posições dos agentes e as dimensões do ambiente.

Desta forma, resolvermos gerar uma aproximação do Diagrama de Voronoi utilizando morfologia matemática. O princípio básico da Morfologia Matemática consiste em extrair informações relativas à geometria e à topologia de um conjunto desconhecido de uma imagem (*grid*), a partir de transformações de formas, realizadas através de operadores elementares denominados **dilatação** e **erosão** (Suruagy & Ramos 1997). Para o propósito de gerar as áreas de influência, apenas o operador de dilatação foi utilizado.

Com a finalidade de ilustrar o efeito do operador de dilatação, a Figura 30 mostra um *grid* com duas atrações posicionadas, uma representada em azul e a outra em vermelho. Na Figura 31a, pode-se observar uma primeira iteração deste operador. Nesta Figura, tem-se que as posições das atrações são expandidas, definindo regiões em torno das atrações, ou seja, suas áreas de influência. As Figuras 31b e 31c mostram as outras iterações do operador, até o encontro das regiões (preenchimento do *grid*). A Figura 31c mostra o resultado final, ou seja, as áreas de influência das duas atrações.

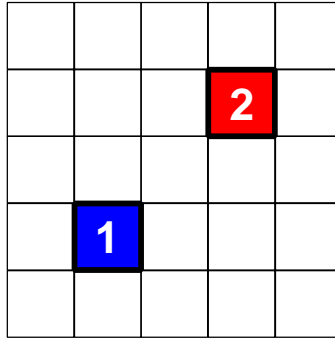


Figura 30. *Grid* com atrações.

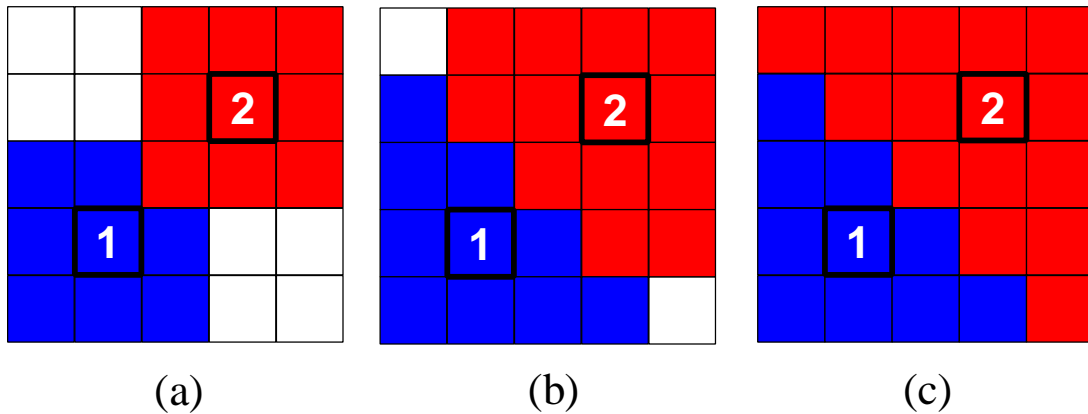


Figura 31. Iterações para gerar as áreas de influência.

Utilizando a abordagem por morfologia matemática, cria-se um *grid* e associa-se seus pixels com as coordenadas da região em estudo (georeferenciamento do *grid*). Com isso, posicionou-se as atrações no *grid* e aplicou-se o operador de dilatação iterativamente até que todos os espaços do *grid* fossem preenchidos, definindo, assim, as áreas de influência (Seixas et al 2001). A Figura 32 mostra a simplificação do Diagrama de Voronoi, gerado por morfologia matemática, com as quadras (polígonos em azul) e a localização das atrações (círculos verdes) sobrepostos.

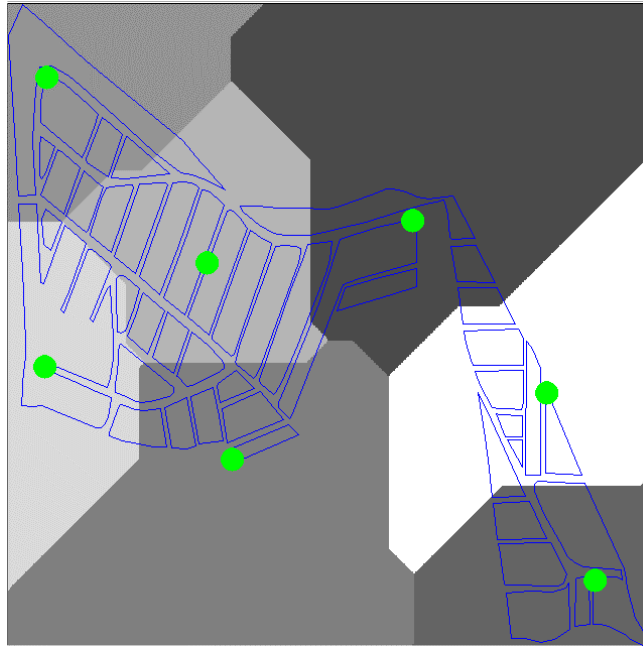


Figura 32. Simplificação para o Diagrama de Voronoi.

Um restrição importante desta abordagem, está relacionada com o fato de utilizarmos a distância Euclidiana para definir as áreas de influência. Nem sempre a atração mais próxima pela distância Euclidiana corresponde ao menor trajeto através das ruas de uma região.

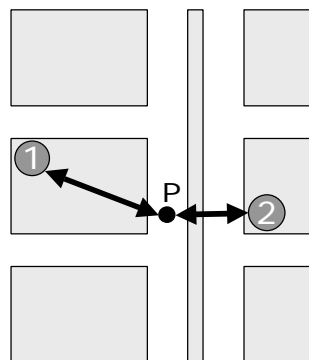


Figura 33. Distância entre pedestre e duas atrações.

Na Figura 33 há um pedestre (na posição **P**) e duas atrações (indicadas pelos números **1** e **2**). Embora o afastamento medido através da distância Euclidiana indique que a atração **2** está mais próxima do pedestre, o trajeto percorrido pelo pedestre até a atração **1** é menor. A Figura 34 mostra os trajetos do pedestre até as atrações **1** e **2**.

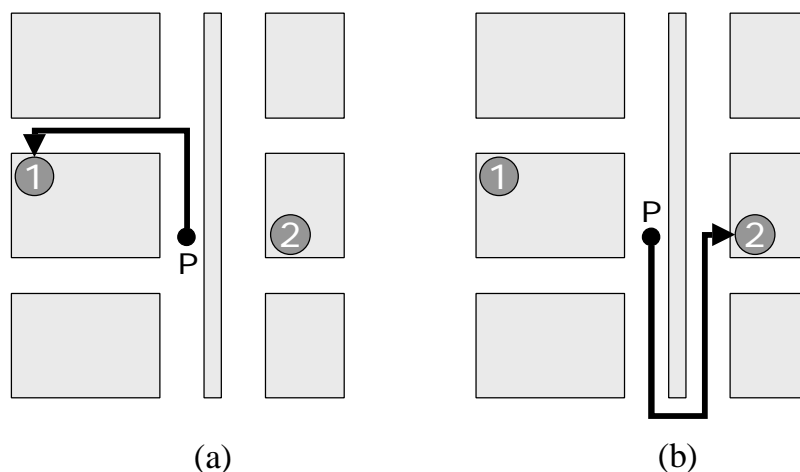


Figura 34. Percurso do pedestre até as atrações.

Além disso, a abordagem adotada para as áreas de influência está apoiada na proposta inicial dos modelos gravitacionais. Ao longo dos anos, estes modelos têm sido adaptados para considerar variáveis relacionadas com a movimentação populacional e suas demandas socioeconômicas, a exemplo do modelo de Huff (Aranha & Figoli 2001). Assim, embora (Schelhorn et al 1999) afirme que estes modelos são inadequados para o estudo da movimentação de pedestres, as novas formulações gravitacionais (ou os outros modelos do campo do Geomarketing) precisam ser avaliadas.

5.2.3 Planejamento de Caminhos

Ao contrário dos padrões que os pedestres apresentam durante o movimento, não foram encontradas referências que apresentassem uma abordagem para planejamento de caminhos baseada em resultados empíricos. Alguns dos modelos da literatura utilizam um dos já conhecidos algoritmos da computação para encontrar caminhos em uma malha ou grafo (*Path finding*, *Path Planning* ou *Route Choice Algorithms*). No entanto, a utilização destes algoritmos não é uma regra porque, como eles não foram originalmente concebidos para o problema da movimentação de pedestres, apresentam algumas incoerências com as evidências das observações.

Em (Jiang 1999) é apresentado um modelo de pedestres que emprega dois modos de movimentação para os agentes: aleatória e objetiva. Na movimentação aleatória, os agentes circulam pelas ruas e quando encontram um cruzamento decidem aleatoriamente a próxima rua para continuar o movimento. Esta movimentação tem

um caráter exploratório do ambiente, típico de turistas. A movimentação objetiva faz com que os agentes decidam pela ruas que os aproxime de seus destinos.

Em (Schelhorn et al 1999) é proposto um modelo que possui uma etapa de pré-processamento para determinar os destinos e os respectivos caminhos de todos os agentes baseados em suas características socioeconômicas (geradas a partir de dados estatísticos). Estes caminhos são gerados a partir de um algoritmo de caminho mínimo (*shortest path algorithm*) utilizando as informações das ruas. Com isso, os agentes são inseridos no ambiente de simulação já com o conhecimento do caminho que os levará até o destino. Para evitar uma movimentação ótima naquele modelo (todos os agentes sabendo exatamente como chegar aos seus destinos) foi incluído um parâmetro de fixação que indica o quanto o agente estará disposto a seguir o caminho pré-definido ou ser distraído por atrações (compatíveis com suas características socioeconômicas, tais como: sexo e salário) durante o percurso.

Baseado nestes trabalhos, resolveu-se adotar um planejamento de caminho aleatório tal como proposto em (Jiang 1999). Com isso, os agentes podem movimentar-se (interagindo) por todo o espaço disponível na região em estudo. Entretanto, quando os agentes precisam encontrar uma atração para atender suas necessidades, restringimos o espaço de movimentação deles somente na área de influência das atrações em que eles estejam localizados no momento em que “percebem” a necessidade.

É importante salientar que o planejamento de caminhos adotado apenas define como ocorre a decisão nos cruzamentos. A ação de “caminhar” pela rua escolhida é executada por um comportamento específico, que será apresentado na seção a seguir.

5.2.4 Modelagem Comportamental

A modelagem de comportamentos para o caso urbano consiste em definir comportamentos que permitam a reprodução das características observadas na movimentação dos pedestres.

Analogamente ao caso militar, buscou-se utilizar os comportamentos de manobra genéricos propostos por Reynolds (1999). Entretanto, devido às particularidades dos dados de SIG que foram empregados, foram realizadas algumas adaptações que serão discutidas mais adiante. De um modo geral, verificou-se que são necessários apenas os comportamentos **Seguir Caminho** e **Evitar Colisão**.

5.2.4.1 Seguir Caminho

Inicialmente, adotamos o comportamento **Seguir Caminho** tal como descrito por Reynolds (1999). No entanto, verificou-se na simulação que os pedestres estavam colidindo frequentemente com os limites das quadras em alguns locais ou, então, não utilizavam o espaço disponível para movimentação e, com isso, apresentavam uma tendência para ficarem alinhados no centro da rua.

Após a análise destes efeitos, constatou-se que as colisões com os limites das quadras ocorriam porque este comportamento, originalmente, sugere que os agentes devem desviar-se para o centro da rua sempre que houver um afastamento maior desta, do que uma distância pré-definida. Assim, nas ruas estreitas havia a tendência de colisões enquanto nas ruas largas ocorria o movimento alinhado com o centro da rua. Esta condição de desvio (para o centro da rua) não pode ser considerada, quando se utiliza dados de ambientes reais, porque as ruas não possuem a mesma largura. Após remover a condição, os agentes apresentaram uma movimentação mais adequada.

5.2.4.2 Evitar Colisão

Conforme pode ser visto na seção 2.1.3.1, o comportamento **Evitar Colisão** requer uma área retangular para detectar as possíveis colisões no trajeto dos agentes. No entanto, o mecanismo de percepção do modelo proposto utiliza uma área de detecção que é circular e muito mais ampla do que necessita o comportamento. Desta forma, adaptou-se o mecanismo de percepção do modelo para incorporar essa área retangular, exclusivamente para detectar colisões. Assim, os agentes desviarão somente dos obstáculos que estiverem no interior da área de colisão, ou seja, próximos de suas trajetórias. Isso evita que obstáculos sem potencial de colisão sejam considerados. A largura desta área para detecção de colisões é definida pelo diâmetro da área de conforto e o seu comprimento é metade do alcance do campo visual. A Figura 35 mostra o mecanismo de percepção do modelo ampliado.

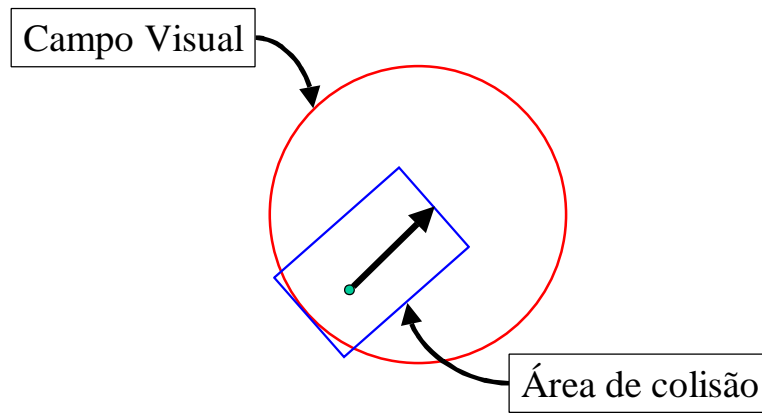


Figura 35. Campo visual e área de colisão

Como se sabe, o movimento dos agentes é o resultado da soma de pequenos desvios (*steering*) à orientação planejada (que sempre está direcionada para um cruzamento). Para evitar que a soma de um destes desvios altere a orientação planejada do agente para uma orientação oposta, atribuímos nessa soma de desvios um peso maior ao componente que indica a orientação planejada. Esses pesos não possuem valores absolutos e devem ser ajustados de acordo com a região em estudo. Nos testes que foram realizados, utilizou-se um peso de 60% para a orientação planejada e 40% para o desvio de evitar colisão. A medida que se diminui o peso do desvio que evita colisões, os agentes apresentam uma tendência para passar uns por cima dos outros (ignorando a colisão). Quando aumentamos o valor deste peso, os agentes apresentam desvios abruptos (com relação a orientação que vinham apresentando). Os valores dos pesos para a orientação planejada e para o desvio de evitar colisões são parâmetros no protótipo que foi implementado.

5.2.5 Ambiente

Os espaços urbanos reais são repletos de elementos que, de alguma forma, influenciam na movimentação dos pedestres, como por exemplo: placas de sinalização, ruas, guardas, etc. Entretanto, é importante selecionar os elementos fundamentais para o modelo. Desta forma, baseado nos estudos de Jiang (1999) e Schelhorn et al (1999), verifica-se que as informações sobre ruas e quadras são suficientes para caracterizar o espaço de movimentação dos pedestres.

As ruas foram selecionadas porque é por onde os pedestres se movimentam enquanto as quadras delimitam o espaço livre para movimentação. Como se tem o interesse em utilizar dados reais de SIGs, é importante adotar a estruturação usual

dessas informações nos SIGs, para permitir que dados de diferentes fontes e regiões possam ser carregados no modelo proposto. Assim, o modelo suporta que as ruas sejam fornecidas segundo uma malha (rede) de eixos centrais e as quadras como polígonos.

Os eixos das ruas consistem em segmentos de reta que correspondem às linhas centrais das ruas de uma região. Os polígonos das quadras delimitam as áreas intransponíveis pelos pedestres. A Figura 36 mostra uma imagem aérea de uma região urbana com algumas ruas, a Figura 37 mostra esta imagem aérea com os eixos das ruas sobrepostos e a Figura 38 mostra a imagem aérea com os limites das quadras.



Figura 36. Imagem aérea.



Figura 37. Imagem aérea com ruas destacadas.



Figura 38. Imagem aérea com quadras destacadas.

Para atender ao planejamento de caminhos, estruturou-se internamente, no modelo, os eixos das ruas segundo uma lista de adjacências⁷. Com esta estrutura de dados foi possível organizar os cruzamentos de ruas de modo que fosse fácil determinar para qualquer cruzamento as ruas que o formavam.

5.2.6 Protótipo Urbano

Com que foi visto, foi possível implementar um protótipo para simular o modelo de movimentação de pedestres. Para executar este protótipo, deve-se definir o ambiente de simulação e adicionar os agentes.

O ambiente de simulação é definido através da especificação dos arquivos que contém a malha de eixos centrais das ruas e os polígonos das quadras. Estas informações são suficientes para que os agentes possam se movimentar pelo ambiente de simulação. Além disso, o protótipo permite que o usuário defina interativamente a localização das atrações no ambiente. Pode-se ainda calcular as áreas de influência das atrações. Durante a simulação, o usuário pode visualizar a sobreposição de toda as informações do ambiente (ruas, quadras, atrações e áreas de influência).

⁷ Estrutura de dados utilizada para representar grafos. No caso urbano, a malha de ruas pode ser interpretada como um grafo, onde os cruzamentos de ruas são seus vértices e as ruas propriamente ditas são suas arestas.

A adição de agentes pode ser feita em grupos ou individualmente. A adição em grupos permite a especificação do número de agentes que deverá ser criado e os distribui aleatoriamente pelas ruas do ambiente. A adição individual cria um agente por vez e permite que o usuário os posicione no ambiente. Os dois modos de adição permitem a definição dos parâmetros dos agentes (área de conforto, alcance da visão, velocidade máxima, etc.). Além disso, durante a simulação pode-se incluir novos agentes, ajustar suas propriedades ou removê-los.

Para auxiliar a análise da simulação, o protótipo oferece uma ferramenta que mostra a ocupação (número de agentes) das ruas através de uma representação onde os eixos das ruas são apresentados em tons entre as cores azul e vermelho. As tonalidades mais próximas da cor azul indicam baixa ocupação enquanto que as de cor vermelho indicam alta ocupação.

A Figura 39 mostra a interface do protótipo com a janela de ocupação das ruas do ambiente visível.

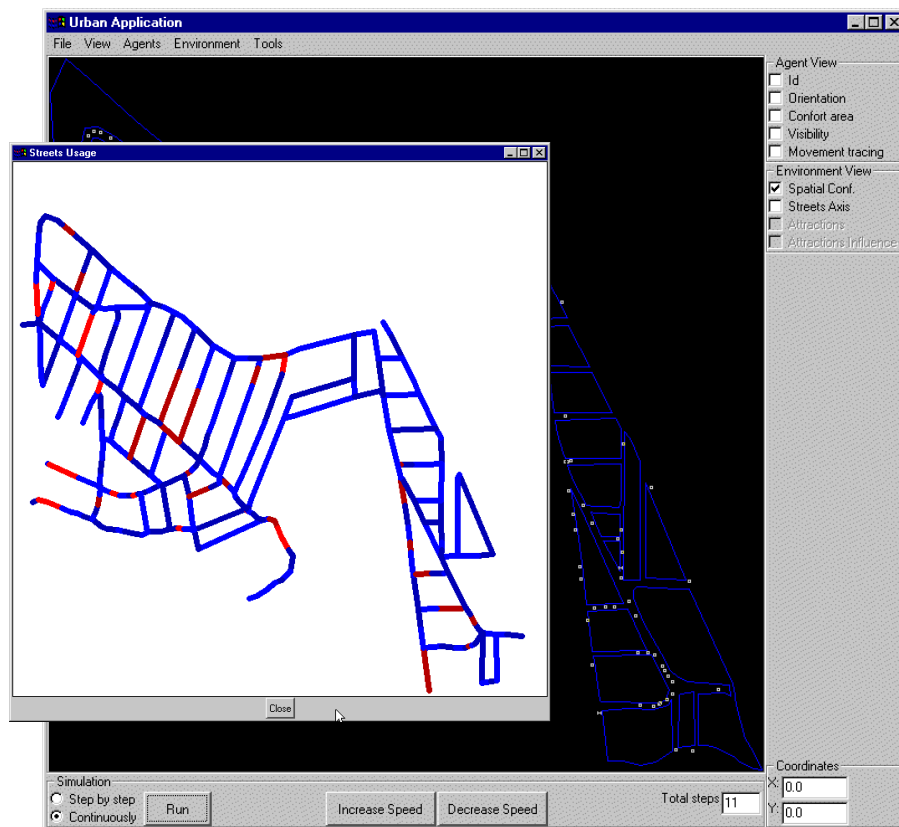


Figura 39. Interface do protótipo.

6 Resultados

Nesta seção serão apresentados alguns resultados obtidos com a simulação dos modelos para os estudos de caso militar e urbano. Foram selecionados dois resultados de cada caso para mostrar a validade dos modelos.

6.1 Caso Militar: Coerência do Modelo de Atrito

Conforme foi discutido anteriormente na seção 5.1.3, as equações de Lanchester propõem que os danos sofridos por um elemento de combate, durante o engajamento, são proporcionais ao quadrado do poder de combate do oponente.

Com isso, em algumas situações do confronto pode ser interessante juntar elementos de combate com a finalidade de que atuem como um único elemento e, com isso, sua eficiência no engajamento possa ser consideravelmente aumentada. A explicação para esse aumento de eficiência está relacionada com a definição quadrática das equações de Lanchester.

Para ilustrar o que foi dito, pode-se considerar a situação em que um elemento com valor de poder de combate igual a 200, engaja com dois elementos cujos valores de poder de combate sejam iguais a 100. Pela definição quadrática das equações de Lanchester, o elemento com valor de poder de combate igual a 200 é muito superior aos outros dois elementos, porque $200^2 > 100^2 + 100^2$. Além dessa análise numérica, outros autores consideram que a maior eficiência de elementos, que se juntam, está relacionada com a possibilidade de ações mais coordenadas e organizadas.

Embora o modelo proposto empregue um cálculo de atrito simplificado (**PCO/PCE**), foi possível reproduzir este efeito. A Figura 40 mostra um elemento de combate atacando frontalmente dois elementos de combate de defesa. O elemento de ataque está representado em azul e possui poder de combate igual a 200. Os elementos de defesa estão representados em vermelho e cada um possui poder de combate igual a 100. A Figura 41 mostra um gráfico onde podemos acompanhar a redução no poder de combate dos elementos de defesa até a eliminação, conforme esperado. Este gráfico mostra, ainda, que o engajamento não ocorre entre os três elementos ao mesmo tempo, conforme a estratégia adotada para tratar situações concorrentes.

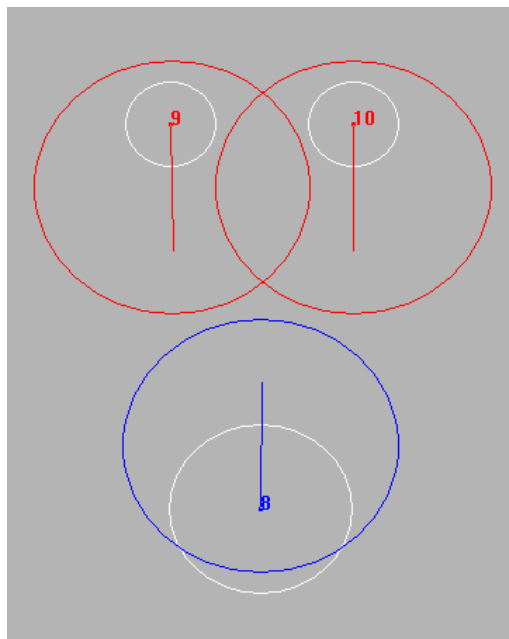


Figura 40. Elemento atacando duas patrulhas de defesa.

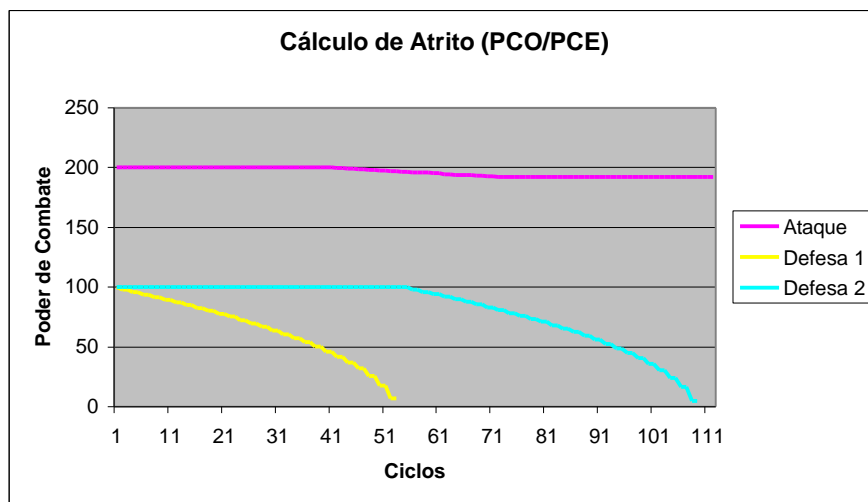


Figura 41. Evolução do engajamento entre os elementos.

Mesmo não utilizando um cálculo de danos quadrático, como as equações de Lanchester, este efeito pôde ser reproduzido devido a simplificação adotada para o conceito de poder de combate. Conforme foi discutido anteriormente, o valor do poder de combate corresponde ao alcance do armamento dos elementos de combate. Assim, elementos com maior poder de combate consequentemente podem atingir oponentes mais afastados. Desta forma, os elementos com menor poder de combate sempre serão atingidos antes que possam atingir os elementos com maior poder de combate. Além

disso, a medida que um elemento com menor poder de combate é atingido, o alcance de seu armamento também diminui, fica mais difícil atingir o oponente com maior poder de combate.

6.2 Caso Militar: Detecção de Inimigo

Uma situação típica de confrontos militares ocorre quando uma patrulha de defesa detecta a presença de oponentes. Segundo os especialistas militares, dependendo da natureza da ação da patrulha (defensiva ou ofensiva), a patrulha deverá apenas observar o deslocamento do oponente, tomando o cuidado para não ser detectada, ou perseguir o oponente e tentar eliminá-lo. Isto está simplificado no plano tático adotado neste trabalho.

Para simular esta situação com o modelo proposto, foram adicionadas duas patrulhas de defesa (com natureza ofensiva) e um elemento de combate de ataque (com natureza defensiva) ao ambiente de simulação. A Figura 42 ilustra o que foi dito.

Conforme pode ser observado na Figura 42, o elemento de combate de ataque (em azul) foi orientado de modo que seu trajeto cruzasse a trajetória das patrulhas de defesa (em vermelho). No entanto, tomou-se a precaução para que o elemento de ataque não detectasse subitamente as patrulhas, pois poderia caracterizar uma situação diferente (contato fortuito) da que está sendo investigada (Patrulha vê mas inimigo não).

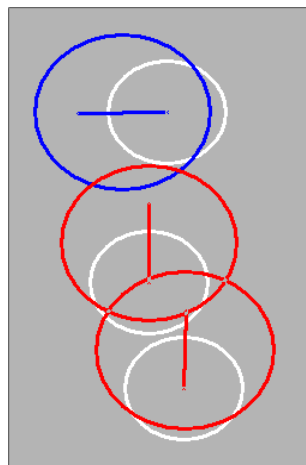


Figura 42. Elemento de combate de ataque próximo de patrulhas de defesa.

A Figura 43 mostra quando um dos elementos da patrulha de defesa detecta o oponente (situação Patrulha vê mas inimigo não) e, com isso, altera sua orientação para

iniciar a perseguição ao oponente. Na Figura 44, pode-se visualizar o elemento de ataque sendo perseguido por apenas um dos elementos da patrulha, porque o outro elemento da patrulha ainda não detectou que seu “amigo” teve o comportamento alterado.

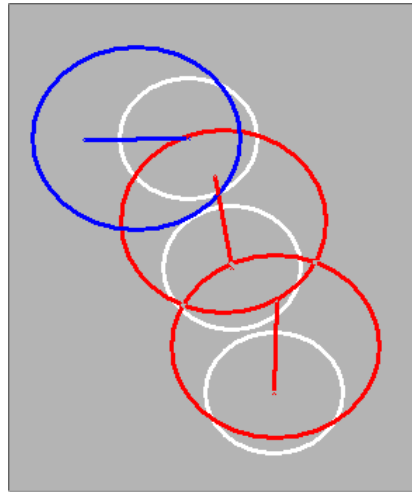


Figura 43. Patrulha de defesa percebe oponente.

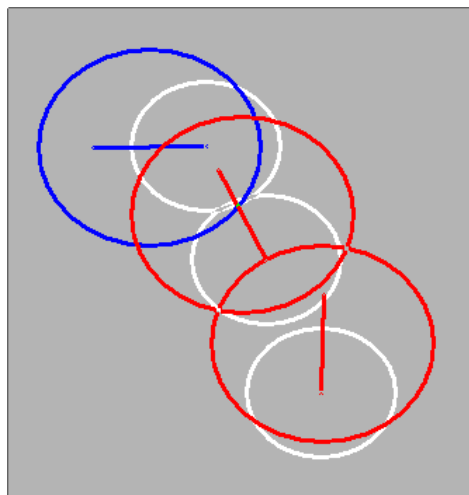


Figura 44. Patrulha de defesa perseguindo oponente.

Após um dos elementos da patrulha iniciar a perseguição ao oponente, o outro elemento percebe a mudança de comportamento de seu “amigo” de defesa (situação alerta inimigo) e também altera o comportamento para poder segui-lo. Na Figura 45, pode-se visualizar o segundo elemento da patrulha seguindo o elemento “amigo”, que persegue o oponente. É importante observar que o oponente não está visível para o

segundo elemento da patrulha. Pode-se considerar esta ação do segundo elemento da patrulha, que apenas segue o “amigo”, como uma forma de cobertura, isto é, um apoio para o caso de alguma eventualidade.

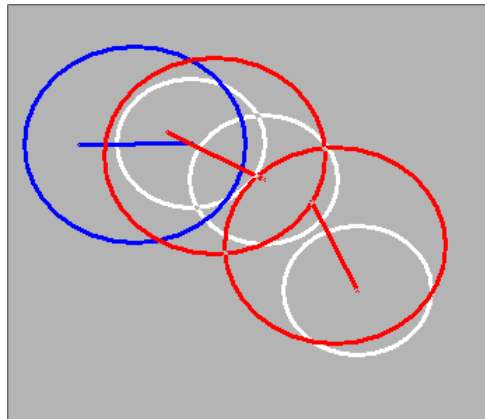


Figura 45. Segunda patrulha percebe situação de Alerta Inimigo.

Em dado momento da simulação, o oponente entra no alcance do poder de combate do elemento de defesa que o perseguia e, com isso, recebe disparos daquele elemento. Como o oponente não tinha conhecimento que estava sendo perseguido (o evento inimigo visível ainda não havia ocorrido), no momento em que recebe os primeiros disparos (evento inimigo atacando), percebe que está em uma emboscada. Desta forma, configura-se o engajamento entre os elementos. A Figura 46 mostra um momento do engajamento no qual podemos observar uma acentuada redução na projeção do poder de combate do oponente.

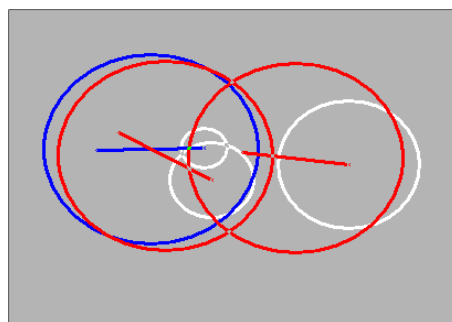


Figura 46. Engajamento entre os elementos.

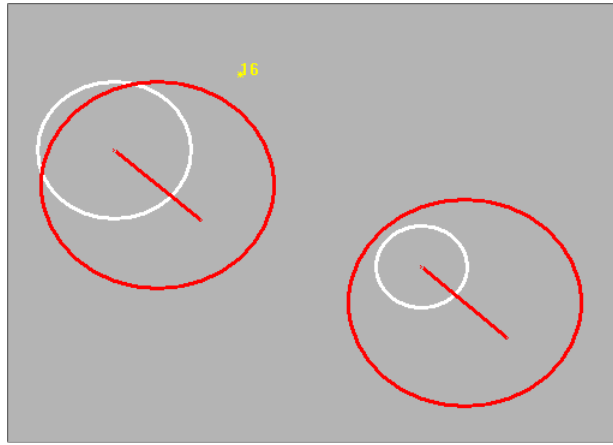


Figura 47. Elementos voltando à patrulha, após a eliminação do oponente.

A Figura 47 mostra os elementos da patrulha retornando à trajetória de patrulhamento inicial, após a eliminação do oponente (em amarelo). Convencionou-se que os elementos de combate em patrulha devem retornar à última posição visitada da patrulha, sempre que seu trajeto for interrompido pela ocorrência de alguma situação do plano tático.

6.3 Caso Urbano: Formação de faixas preferenciais

Conforme dito anteriormente na seção 5.2.1.3, quando a densidade de pedestres aumenta em uma determinada localidade, verifica-se a formação de faixas preferenciais para o deslocamento de pedestres com mesma orientação.

A simulação do modelo proposto permite reproduzir este efeito de formação de faixas preferenciais. Entretanto, é importante salientar que os únicos comportamentos adotados no modelo de pedestres são para seguir um caminho e evitar as colisões, ou seja, não há uma especificação no modelo para a formação destas faixas preferenciais.

A Figura 48 mostra uma distribuição de agentes que se movimentavam por uma rua durante uma simulação do modelo urbano. As linhas pretas representam os limites das quadras. Os agentes são identificados através dos círculos azuis e os segmentos de reta brancos, que se iniciam nos círculos, definem a orientação destes agentes. Analisando esta Figura, podemos destacar a existência de faixas preferenciais conforme nos mostram as Figuras 49 e 50.

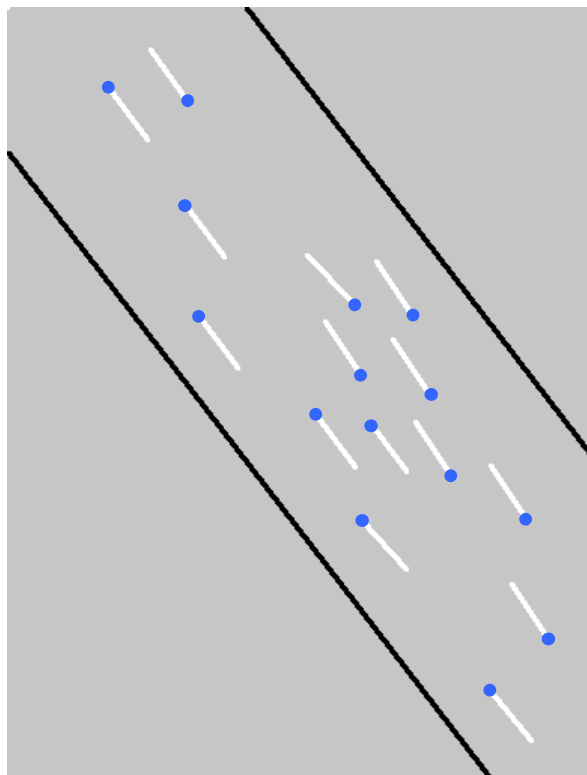


Figura 48. Agentes se deslocando por uma rua.

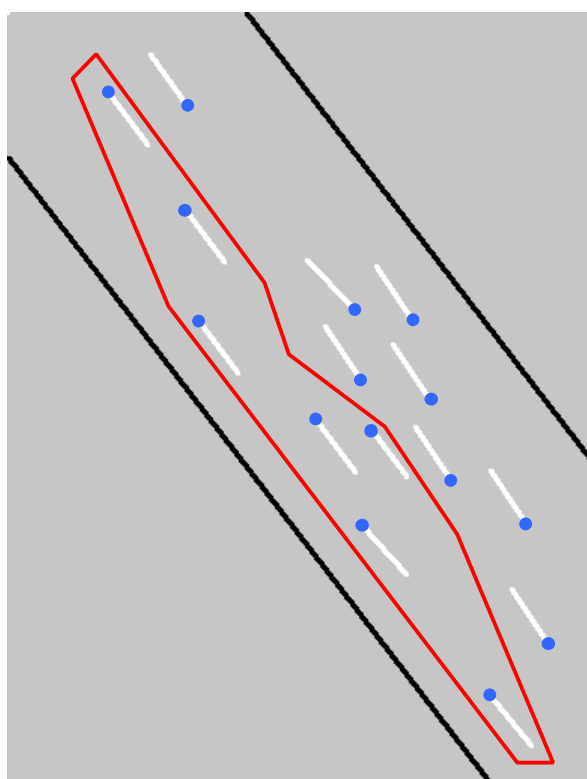


Figura 49. Faixa com agentes se deslocando de cima para baixo.

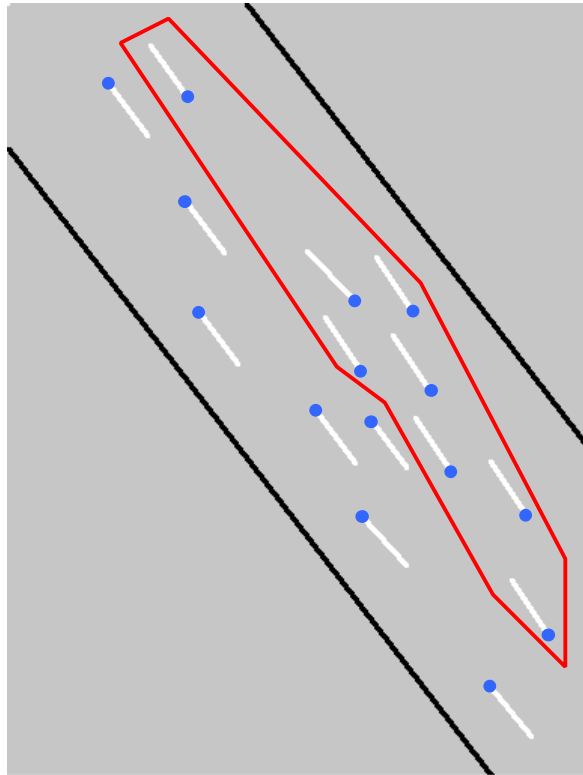


Figura 50. Faixa com agentes se deslocando de baixo para cima.

6.4 Caso Urbano: Tratamento de colisões

O comportamento para evitar colisões desempenha um importante papel no modelo de pedestres, pois impede que os agentes passem uns por cima dos outros (o que comprometeria a validade do modelo) e assegura que os agentes se movimentem somente pelas ruas (sem invadir as quadras).

Com a finalidade de avaliar o comportamento para evitar colisões, foram posicionados vários agentes em uma rua, parados e próximos uns dos outros. O objetivo foi reproduzir a aglomeração de pessoas, típica de áreas onde há alta concentração de atrações ou ocorrem eventos populares, porque essas aglomerações dificultam a circulação dos pedestres que querem passar pela rua. A Figura 51 mostra a aglomeração de agentes, representados por pontos brancos.

Desta forma, adicionou-se um agente no ambiente com a finalidade de passar pela aglomeração de agentes. A Figura 52 mostra o trajeto (em vermelho) do agente, ao passar (no sentido de cima para baixo) pela aglomeração.

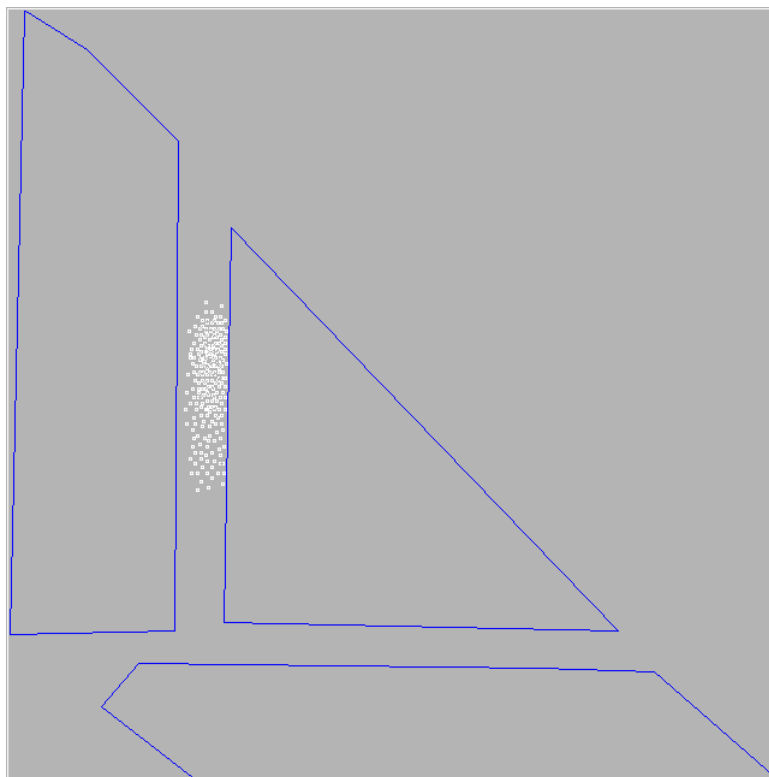


Figura 51. Aglomeração de agentes em uma rua.

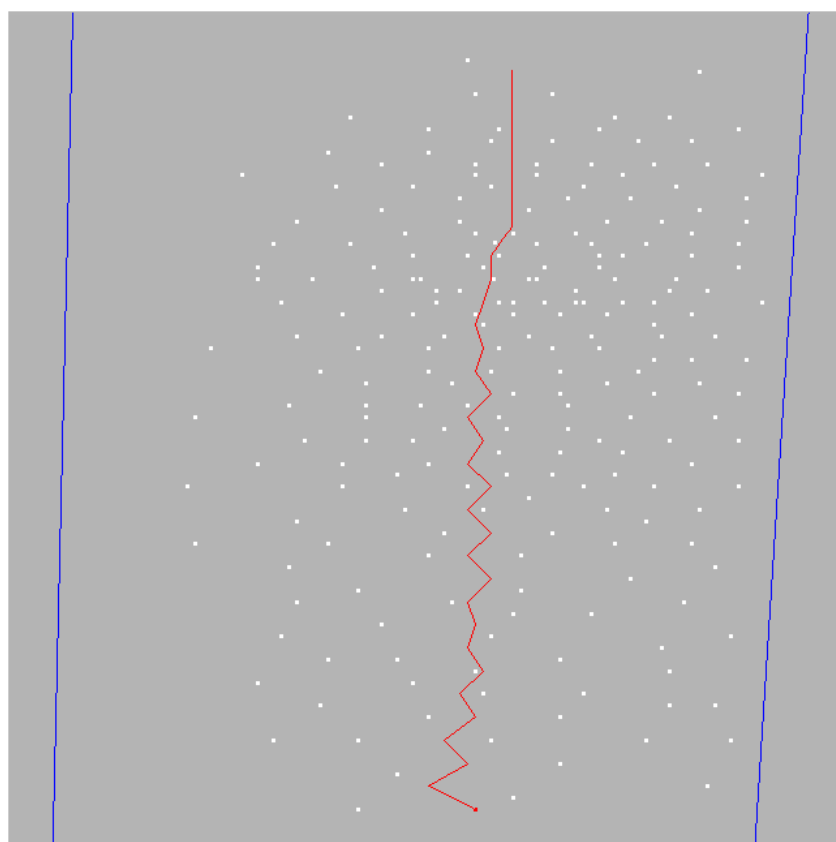


Figura 52. Trajeto de um agente evitando colisões.

7 Conclusões

Os resultados obtidos comprovaram que a abordagem descentralizada, para a construção de modelos para a simulação de sistemas, possibilita a reprodução de fenômenos complexos, a partir de uma formulação simplificada dos mesmos, baseada na interação entre seus componentes.

Segundo a abordagem descentralizada, um fenômeno complexo pode ser reproduzido a partir da interação entre agentes que simulam os componentes do fenômeno. Entretanto, como foi visto nos estudos de casos, os agentes também interagem com o ambiente. Desta forma, adotar uma representação adequada e precisa para o ambiente é um fator importante para a modelagem.

Sendo assim, propõe-se a integração do modelo de agentes com dados oriundos dos Sistemas de Informação Geográficas (SIGs) porque estes sistemas possuem um conjunto de ferramentas específicas para criar e gerenciar representações precisas do espaço geográfico. Para implementar esta integração, resolveu-se acessar diretamente os dados de SIGs armazenados nos formatos *Arcview Shapefile* e *Arcview Binary Grid*, porque estes formatos de dados podem ser facilmente decodificados e possuem documentação disponível na Internet.

O objetivo principal, que é a modelagem de comportamentos, foi facilitado com a utilização de alguns comportamentos genéricos propostos em Reynolds (1999). Os comportamentos genéricos definem ações básicas (tais como: ir até uma determinada localização, seguir um caminho especificado, etc.) e podem ser associados para a criação de outros comportamentos mais complexos e específicos para determinados fenômenos.

Embora existam algumas ferramentas para a simulação de agentes, permitindo que os pesquisadores direcionem seus esforços para a construção de modelos ao invés do desenvolvimento de *software*, não foram encontradas referências deste tipo de ferramenta que operasse integradas com dados de SIGs. Sendo assim, foi necessário especificar uma arquitetura que permitisse o desenvolvimento dos protótipos para implementar os casos abordados.

A arquitetura adotada é composta por três camadas, que definem como os componentes do modelo de agentes e ambiente se relacionam durante o ciclo de simulação. De um modo geral, as camadas da arquitetura estão relacionadas com a percepção do ambiente, a decisão de qual ação adotar (baseada na motivação e

objetivos dos agentes) e a execução da ação (comportamento) escolhida. Embora simplificada, esta arquitetura mostrou-se suficiente para atender aos casos abordados e ainda pode ser facilmente expandida para incluir novos recursos, tais como: indexação espacial, a fim de acelerar o mecanismo de percepção, memória para permitir que os agentes “lembrem” de ações e decisões recentes, etc.

Como contribuição, foram implementados dois estudos de casos: um, modelando a movimentação de soldados em um terreno, baseada em algumas regras simplificadas de combate, e o outro, a movimentação de pedestres em uma região urbana, baseada em alguns resultados empíricos da literatura.

No estudo de caso militar, aborda-se alguns dos principais tópicos no campo da simulação de confrontos, a saber: detecção de inimigo, movimentação de elementos e cálculo dos danos.

Através da utilização de modelos digitais de elevação, foi possível considerar a obstrução que a topografia de um terreno pode promover na detecção de inimigos. Incorporando a informação temática da carta de trafegabilidade no modelo do ambiente foi possível calcular o movimento dos agentes de uma forma mais coerente com as características da região estudada.

Além disso, a partir das informações do plano tático foi possível modelar comportamentos que conseguiram reproduzir algumas ações efetuadas nos treinamentos reais. Os comportamentos militares foram implementados a partir da combinação dos comportamentos genéricos utilizando eventos da simulação. A representação desses comportamentos através de uma máquina de estados (onde os comportamentos genéricos são os estados e os eventos definem quando ocorre a transição entre estados) permitiu uma visão clara da modelagem adotada.

Embora seja bastante simplificado, o cálculo de danos adotado permitiu calcular a evolução do engajamento entre os elementos de combate e, ainda, mostrou-se coerente com alguns efeitos inerentes da formulação original das equações de Lanchester.

No estudo de caso urbano, verificou-se que um conjunto reduzido de comportamentos pode servir de base para a simulação da movimentação de pedestres. Ao contrário do estudo de caso militar, foram utilizados os próprios comportamentos genéricos (Seguir Caminho e Evitar Colisão) com pequenas alterações para adequá-los ao caso urbano.

O ambiente foi definido utilizando as representações usuais para espaços urbanos adotadas nos SIGs, ou seja, polígonos para representar o limite das quadras e uma malha de linhas representando o eixo central das ruas.

Ao invés de utilizar um dos algoritmos já conhecidos para planejamento de caminhos, os agentes definem aleatoriamente qual rua devem tomar sempre que um cruzamento é alcançado.

A partir da simulação deste modelo urbano, foi possível reproduzir alguns efeitos da movimentação de pedestres reportados na literatura, tais como: a formação de filas em áreas densas e de faixas preferenciais para a movimentação de pedestres com mesmo sentido, de deslocamento.

Além disso, seguindo a tendência das pesquisas atuais com modelos de pedestres, adicionou-se os conceitos de atração e necessidade ao modelo, buscando simular o impacto destas variáveis na movimentação dos pedestres. Para restringir o espaço de busca dos agentes quando procuram por atrações (já que não foi adotado planejamento de caminhos), definimos as áreas de influência das atrações baseadas no Diagrama de Voronoi mas implementado utilizando morfologia matemática. Assim, baseado no modelo gravitacional do Geomarketing, os agentes limitam sua busca na área de influência em que estejam localizados porque é onde está localizada a atração mais próxima (segundo a distância Euclidiana).

8 Trabalhos Futuros

Uma adaptação que pode expandir as possibilidades de aplicação do modelo proposto refere-se ao suporte para comunicação entre os agentes. Com isso, os agentes poderiam trocar informações durante a simulação. Isso seria útil para simular, por exemplo no caso urbano, um turista que pergunta aos agentes próximos como chegar em determinado ponto turístico. No caso militar, pode-se imaginar elementos de combate afastados no terreno mas que se comunicam utilizando rádio comunicadores.

Seria interessante definir uma linguagem para programação de comportamentos genéricos baseada somente nos parâmetros e componentes do modelo de agentes. Isso permitiria o desenvolvimento de bibliotecas de comportamentos genéricos. A meta seria ter um ambiente interativo onde os comportamentos complexos fossem criados graficamente associando os comportamentos da biblioteca com os eventos da simulação, sem a necessidade de programação de código.

No estudo militar, pode-se melhorar o cálculo dos danos considerando mais variáveis, a começar por alguns aspectos fisiológicos que podem ser facilmente inseridos no modelo atual, tal como o cansaço. Pode-se adicionar mapas de vegetação no modelo para tornar o cálculo de acuidade visual mais preciso.

Além disso, a inclusão de um módulo para percepção auditiva traria mais realismo à simulação. Atualmente, confrontos relativamente próximos de alguns agentes passam despercebidos porque há a necessidade da detecção visual.

No caso urbano, verifica-se que é necessário incluir algum mecanismo de indexação espacial para podermos simular um número maior de agentes e refletir a concentração típica dos centros urbanos.

A definição das áreas de influência pode ser melhorada com um estudo mais aprofundado nos modelos de interação do Geomarketing e a utilização de dados socioeconômicos. O modelo atual de necessidades e atrações pode ser expandido para suportar várias outras necessidades e suas atrações correspondentes. Com isso, seria possível estabelecer um estudo mais complexo do impacto da localização das atrações no movimento dos pedestres.

O planejamento de caminhos para os pedestres pode ser modificado da atual abordagem aleatória para outra mais próxima das evidências que indicam que os pedestres tendem a escolher os caminhos mais rápidos mas não necessariamente os mais curtos (Helbing et al 2002).

Além disso, seria interessante estudar a aplicação do modelo de pedestres proposto em planos de emergências para a previsão de cenários tais como: incêndios, tumultos, etc.

9 Referências

1. Aranha, F., Figoli, S., 2001, *Geomarketing: Memórias de viagem*, Disponível em: <http://www.fgvsp.br/academico/professores/Francisco_Aranha/memorias.PDF>, Acesso em: 15 Julho 2003.
2. *Artificial Intelligence and Games Lecture Notes*, Disponível em: <<http://www.computing.dcu.ie/~tonyv/gamesAI/>>, Acesso em: 17 Jul 2003.
3. Brito, J.L.S., Rosa, R., 1996, *Introdução ao Geoprocessamento: Sistema de Informação Geográfica*, Uberlândia.
4. Brooks, R. A., 1991, “Intelligence without reason”. In: *Proceedings of the twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp.569-595, Sydney, August.
5. Brooks, R. A., 1990, “Elephants don’t play chess”, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, v. 6, pp. 3-15.
6. Claramunt C., Jiang B., 2001, “A Qualitative Model for the Simulation of Traffic Behaviours in a Multi-lane Environment”, *Journal of Geographical Sciences*, v. 11, Special issue on geo-visualization, pp. 29-42.
7. Costa, M., 1997, *Animação Comportamental Baseada em Agentes*. Tese de D.Sc., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
8. Dunnigan, J. F., 1997, *The Complete Wargames HandBook*, Disponível em: <<http://www.hyw.com/Books/WargamesHandbook/Contents.htm>>, Acesso em: 17 Jul 2003.
9. Feurtey, F., 2000, *Simulating the Collision Avoidance Behavior of Pedestrians*. Tese de M.Sc., University of Tokyo, Tokyo, Japan.
10. Figueiredo, L.H., Carvalho, P.C.P., 1991, “Introdução à Geometria Computacional”. In: *Anais do 18o. Colóquio Brasileiro de Matemática*, Instituto de Matemática Pura e Aplicada - IMPA, Rio de Janeiro.
11. Helbing, D., Farkas, I.J., Molnár, P., et al., 2002, “Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations”. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 21-58.
12. Ingham, J., 1997, *What is an Agent ?*. Technical Report #6/99, Centre for Software Maintenance, University of Durhan, Durhan, London.

13. Ioerger, T. R.; Volz, R. A.; Yen, J.; 2000, "Modeling Cooperative, Reactive Behaviors on the Battlefield with Intelligent Agents". In: *Proceedings of the ninth Conference on Computer Generated Forces (9th CGF)*, pp. 13-23, Orlando, Maio.
14. Itami, B., Gimblett, R., Raulings, R., et al., 1999, "RBSim: Using GIS-Agent simulations of recreation behavior to evaluate management scenarios", In: *Proceedings of AURISA 99 Conference*, Canberra, November.
15. Jiang B., 2000, "Agent-based Approach to Modelling Urban and Environmental Systems within GIS", In: *Proceedings of 9th International Symposium on Spatial Data Handling*, Beijing, August.
16. Jiang B., 1999, "SimPed: Simulating Pedestrian Flows in a Virtual Urban Environment", *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, v. 3, n. 1, pp. 21-30.
17. Kiwielewicz, M., 2000, "Modelos adaptativos para Jogos de Guerra: O Caso do combate terrestre generalizado", *Revista Pesquisa Naval*, n. 13, pp. 93-104.
18. Maes, P., 1994, "Modeling Adaptive Autonomous Agents". In: *Artificial Life Journal*, v. 1, n. 182, pp. 135-162.
19. Maes, P., 1995, "Artificial Life Meets Entertainment: Lifelike Autonomous Agents", *Communications of ACM*, v. 38, n. 11 (Nov), pp. 108-114.
20. Reese, B., Stout, B., 1999, "Finding a Pathfinder", In: *Proceedings of AAAI99 Spring symposium on Artificial Intelligence and Computer Games*, pp. 69-72.
21. Reynolds, C., 1999, "Steering Behaviors for Autonomous Characters", In: *Proceedings of Game Developers Conference 1999*, pp. 763-782, San Francisco.
22. Reynolds, C., 1988, "Not Bumping Into Things", In: *Proceeding of SIGGRAPH 88*, pp. G1-G13, Georgia, Atlanta, August.
23. Reynolds, C., 1987, "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model", In: *Proceedings of SIGGRAPH'87*, pp. 25-34, Anaheim, California, July.
24. Rodrigues, A., Grueau, C., Raper, J. et al., 1998, "Environmental planning using spatial agents". *Innovations in GIS*, v. 5, pp. 108-118.
25. Rodrigues, A., Raper, J., 1999, "Defining Spatial Agents". In: Raper, J., Câmara, A. (eds), *Spatial Multimedia and Virtual Reality*, Research Monographs Series, Taylor & Francis, pp. 111-129.
26. Schelhorn, T., O'Sullivan, D., et al., 1999, "STREETS: An agent-based pedestrian model", In: *Computers in Urban Planning and Urban Management*, Venice, September.

27. Seixas, R.B., Lauro, A., Torres, L., 2001, “Caminho Mínimo em Matrizes de Custo Dinâmico”. In: IV Simpósio de Pesquisa Operacional e V Simpósio de Logística da Marinha – SPOLM 2001, Rio de Janeiro, Dezembro.
28. Seixas, R.B., Figueiredo, L.H., et al., 2000, “Uma metodologia para geração de modelos de elevação a partir de curvas de nível”, In: *Anais do GeoInfo*, pp. 82-87, São Paulo, Junho.
29. Seixas, R.B., Mediano, M.R., Gattass, M., 1999, “Efficient Line-of-sight Algorithms for Real Terrain Data”, In: *III Simpósio de Pesquisa Operacional e IV Simpósio de Logística da Marinha – SPOLM 1999*, Rio de Janeiro, Dezembro.
30. Stout, B., 1996, *Smart Moves: Intelligent Pathfinding*, Disponível em: <<http://www.gamasutra.com/features/19970801/pathfinding.htm>>, Acesso em: 17 Jul 2003.
31. Suruagy, D., Ramos, E., *Aplicação da Morfologia Matemática na Análise de Imagens Binárias*, Disponível em: <<http://www.cin.ufpe.br/~if291/galeria/morfo/Welcome.html>>, Acesso em: 17 Jul 2003.
32. Therakomen, P., 2001, *Mouse.Class – The Experiment for Exploring Dynamic Behaviors in Urban Places*. Tese de M.Sc., University of Washington, Washington, USA.
33. Woodaman, R.F.A., 2000, *Agent-Based Simulation of Military Other Than War Small Unit Combat*. Tese de M.Sc., Naval PostGraduate School, Monterey, California, USA.
34. Wooldridge, M. J., Jennings, N. R., 1995, “Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey”, In: Wooldridge, M. J., Jennings, N. R. (eds), *Proceedings of ECAI’94 – Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1-22.
35. Worboys, M.F., 1995, *GIS: A Computing Perspective*, 1 ed., London, Taylor & Francis.