

# Navegação autônoma de um agente inteligente: um estudo comparativo usando Lógica Fuzzy e Algoritmo de Busca A\*

Eude Pinheiro

Graduado em Ciência da Computação – Uninove.  
São Paulo – SP [Brasil]  
eude.pinheiro@gmail.com

Camila da Costa Kubo

Graduada em Ciência da Computação – Uninove.  
São Paulo – SP [Brasil]  
camkubo@gmail.com

Marcos da Silva Rangel

Graduado em Ciência da Computação – Uninove.  
São Paulo – SP [Brasil]  
macosrangel@gmail.com

Thiago de Almeida Arcari

Graduado em Ciência da Computação – Uninove.  
São Paulo – SP [Brasil]  
iracra325@gmail.com

Cleber Gustavo Dias

Doutor em Engenharia Elétrica  
Professor e pesquisador nos cursos de Ciência da Computação  
e Engenharia Elétrica – Uninove.  
São Paulo – SP [Brasil]  
diascg@uninove.br

Este artigo apresenta um estudo comparativo entre a Lógica Fuzzy e o algoritmo de busca A\*, em um agente inteligente, a fim de solucionar um problema de rotas em navegação autônoma. Mais particularmente, neste trabalho, desenvolve-se uma comparação entre as duas técnicas de inteligência artificial, de modo que se avalie o custo de travessia desenvolvido pelo referido agente, em um terreno hipotético, para o agente se movimentando apenas em ângulos retos e também para sua movimentação em ângulos de passo de 45°. Resultados preliminares relacionados à varredura do algoritmo de busca e da Lógica Fuzzy mostram a viabilidade desta abordagem.

**Palavras-chave:** Algoritmo de busca. Inteligência artificial.  
Lógica Fuzzy. Navegação autônoma.



## 1 Introdução

As técnicas de inteligência artificial hoje disponíveis oferecem ampla variedade de ferramentas capazes de contribuir para a solução e o processo de tomada de decisão de uma série de problemas (RUSSEL; NOVIG, 1995). Tais técnicas são aplicadas em diversas áreas do conhecimento, como engenharia, medicina e setor financeiro.

Alguns trabalhos na área de automação industrial e robótica, por exemplo, oferecem novos recursos vinculados ao uso de agentes inteligentes, tais como o reconhecimento de padrões e a classificação de objetos.

Na esteira desse raciocínio, abre-se um leque importante nesse campo de aplicação, principalmente no que se refere às possíveis implementações da Lógica Fuzzy e de algoritmos de busca tanto em *software* quanto em *hardware* (WEBER; KLEIN, 2003).

A Lógica Fuzzy, comumente conhecida como lógica nebulosa, tem como propósito a modelagem do raciocínio humano de forma aproximada, a fim de desenvolver sistemas computacionais para o processo de tomada de decisão em ambientes incertos (ZADEH, 1965).

Por sua vez, o algoritmo de busca A\* consiste em um algoritmo de busca com informação, ou busca heurística, sendo empregado com o fito de minimizar o custo total estimado para a solução de um problema.

Neste trabalho, apresenta-se um estudo comparativo acerca do uso das duas técnicas de inteligência artificial citadas, na solução do problema de navegação autônoma, a fim de prover novos recursos para o processo de tomada de decisão nesse campo de aplicação. Mais especialmente, as duas técnicas ora apresentadas são empregadas para avaliar o custo total da travessia de um terreno hipotético, modelado conforme sua elevação e dis-

tância entre as células de posicionamento do agente inteligente que serão descritas mais adiante.

## 2 A navegação autônoma

O problema da navegação autônoma motivou muitos estudos voltados para a otimização de rotas e caminhos por meio da aplicação de soluções computacionais. Tais soluções fazem uso de práticas no campo da inteligência artificial, neurociência, robótica, entre outras.

Especialmente no caso da navegação autônoma, o desvio de obstáculos é um dos fatores mais importantes e recorrentes a serem vencidos pelos agentes inteligentes. Cabe informar que o problema da navegação autônoma, envolvendo o uso de robôs móveis, ainda apresenta uma série de limitações, uma vez que a construção de conhecimento prévio do ambiente a ser percorrido, a adaptação a novas situações e a melhor estratégia de navegação demandam de todo o sistema de navegação recursos ainda limitados, mesmo diante do atual avanço tecnológico.

Para efeito da navegação autônoma, deve-se levar em conta, como já mencionado, um conhecimento prévio do referido ambiente, a fim de tomar a melhor decisão com base na técnica já implementada em sua base de dados.

Os chamados veículos autônomos têm sido objeto de muitas pesquisas tanto na indústria militar quanto na indústria civil (STAHL, 2005). Como exemplo, pode-se citar o robô *Trilobite*, um aspirador comercial de pó autônomo, capaz de aspirar pó de um determinado ambiente por meio de um prévio mapeamento do local, utilizando para tal finalidade, ondas ultrassônicas. Dessa forma, tal aspirador calcula a distância e a localização de objetos, evitando colisões no ambiente. Quando a tarefa programada é finalizada, o aspirador *Trilobite* retorna à base para recarregar sua bate-

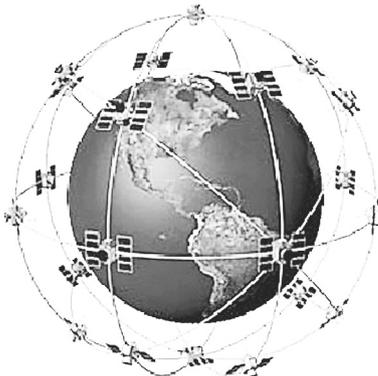
ria. A Figura 1 abaixo ilustra o referido aspirador de pó *Trilobite*.



**Figura 1: Aspirador de pó (robô Trilobite)**

Fonte: *site*: <<http://www.electrolux.com.br>>.

Muitas vezes, um equipamento navegador, assim como um rastreador, conta com um sistema de posicionamento global, também conhecido por *Global Position System* (GPS). Os equipamentos GPS disponíveis operam com uma precisão da ordem de centímetros, o que lhes confere extrema confiabilidade e segurança na determinação precisa de objetos no globo terrestre. É composto por 24 satélites, distribuídos em seis planos orbitais. A Figura 2 ilustra a distribuição de satélites ao redor do globo terrestre, para configurar um sistema GPS.



**Figura 2: Constelação de satélites para um sistema GPS**

Fonte: *site*: <http://www.state.gov> .

### 3 O algoritmo de busca no processo de tomada de decisão

A resolução de problemas por meio de busca, tal como descrita em Russel e Norvig (1995), permite encontrar uma sequência de ações capazes de alcançar determinados objetivos, quando uma ação isolada não é capaz de fazê-lo. Segundo esses autores, normalmente, os agentes de resolução de problemas de busca decidem o que fazer, encontrando uma sequência de ações que levam a estados desejáveis.

Uma ampla variedade de estratégias pode ser empregada para atingir os resultados desejados quanto à solução de um problema de busca. A busca sem informação, também chamada de busca cega, não utiliza qualquer informação adicional acerca dos estados, além daquelas fornecidas na definição do problema. Na conhecida árvore de busca definida por seu espaço de estados, sua raiz é denominada de estado inicial do problema, enquanto o nó final da árvore é chamado de estado objetivo. Os nós intermediários ou aqueles utilizados na expansão da árvore, e não compreendidos no objetivo do agente durante a varredura do algoritmo de busca, são denominados estados não objetivos.

Por outro lado, as buscas com informação, ou busca heurística, procuram um estado não objetivo mais promissor, a partir do conhecimento prévio específico do problema. Nesse sentido, os mecanismos de busca heurística podem encontrar soluções de maneira mais eficiente do que uma estratégia sem informação, tais como descritos em Russel e Norvig (1995).

Neste trabalho, o algoritmo de busca A\*, voltado à minimização do custo total estimado, é utilizado com o fito de obter uma solução para o problema de navegação autônoma, e mais particularmente, para o problema relacionado à travessia



de um terreno, de um campo, ou de uma planície hipotética. Tal solução é comparada mais adiante com uma abordagem orientada para o uso da Lógica Fuzzy no que concerne às características do terreno definido neste estudo.

Ainda no tocante aos algoritmos de busca, salienta-se que o custo computacional envolvido na sua implementação deve ser calculado em função do problema a ser resolvido. Um algoritmo que procura diminuir o tempo computacional durante o seu processamento é chamado Procura Pelo Primeiro Melhor, também conhecido pela sigla BFS, em inglês.

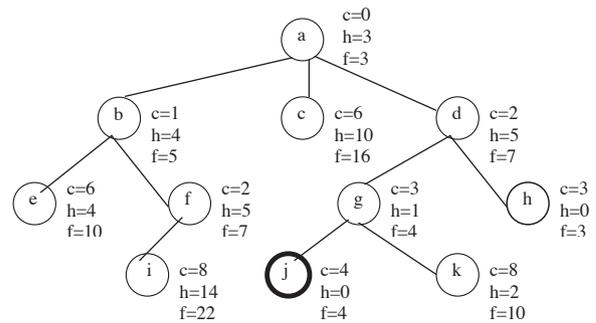
O referido algoritmo emprega um gerenciamento baseado em técnica heurística, o qual realiza a busca pelo caminho desejado de uma forma muito rápida, pois acumula valores de uma pequena área. Esse método é utilizado para soluções que necessitam de respostas substancialmente rápidas (STAHL, 2005).

No que se refere ao algoritmo A\*, tem-se que este procura utilizar o menor custo de travessia entre dois pontos, garantindo sempre o menor caminho para um custo computacional mais baixo, quando comparado a outras metodologias de busca. O algoritmo A\* é considerado um algoritmo heurístico administrável, nunca superestimando os valores ou distâncias entre o ponto inicial e o ponto final (STAHL, 2005).

Mais especialmente, deve-se frisar que o algoritmo de busca A\* consiste na procura por células mais próximas à célula em que se encontra o agente inteligente, colocando-as em uma lista contendo as células e os valores acumulados, exceto as células já transpostas, até que se alcance o destino ou a meta desejada. As células com menor custo são avaliadas primeiro, proporcionando a diminuição do custo entre os dois pontos (STAHL, 2005).

A Figura 3 ilustra um exemplo de árvore de busca, na qual é possível aplicar o algoritmo

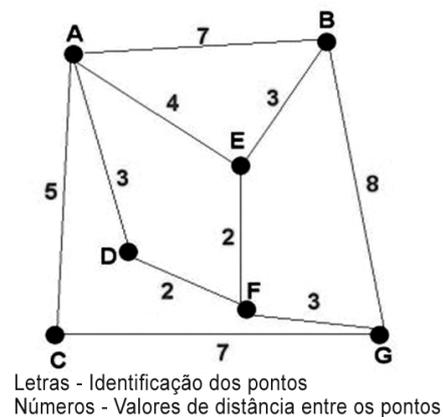
de busca A\* para alcançar o estado objetivo, ou meta, representado, na figura, pela letra “j”. O estado inicial é indicado na mesma figura pela letra “a”. As demais letras mostram os custos relacionados à mudança de um estado para outro.



**Figura 3: Exemplo de árvore de busca e custos relacionados**

Fonte: Os autores.

A Figura 4 ilustra uma rede de pontos na qual o algoritmo A\* pode ser empregado para determinar o menor custo entre dois pontos de travessia – como entre os pontos A e F.



**Figura 4: Rede de pontos**

Fonte: Os autores.

Neste trabalho, o algoritmo A\* é utilizado em um agente inteligente, a fim de determinar o menor custo de travessia de um terreno. O dito terreno é mapeado e subdividido em células (Figura 5).

Pode-se observar, na Figura 5, que o terreno é dotado, em cada célula, de um valor correspondente a sua posição ante a origem em que o agente inteligente iniciará a travessia.

Terreno Mapeado						
A1 3	A2 2	A3 5	A4 2	A5 4	A6 3	A7 3
B1 4	B2 3	B3 3	B4 4	B5 3	B6 2	B7 3
C1 4	C2 4	C3 3	C4 2	C5 3	C6 2	C7 3
D1 2	D2 3	D3 2	D4 1	D5 1	D6 2	D7 4
E1 3	E2 2	E3 3	E4 2	E5 2	E6 3	E7 4
F1 1	F2 1	F3 2	F4 3	F5 2	F6 4	F7 5

Letra# – Nomeação das células

Número – Valor atribuído

**Figura 5: Exemplo de um terreno mapeado a ser transposto**

Fonte: Os autores.

## 4 A Lógica Fuzzy no processo de tomada de decisão para a navegação autônoma

A Lógica Fuzzy surgiu da necessidade de representação da linguagem natural, uma vez que os métodos até então empregados faziam referência ao raciocínio preciso, do tipo “certo” ou “errado”, ou “verdadeiro” e “falso”.

A representação *Fuzzy* utiliza variáveis linguísticas – elementos simbólicos utilizados para descrever o conhecimento – no lugar de variáveis numéricas. Trata-se de uma abordagem orientada para o uso de conjuntos de termos linguísticos atribuídos a uma mesma grandeza a ser medida (WEBER; KLEIN, 2003).

Nesse sentido, a Lógica Fuzzy surge como alternativa para representar modelos de raciocínio impreciso, normalmente existente no pensamento humano e no seu respectivo processo de tomada de decisão.

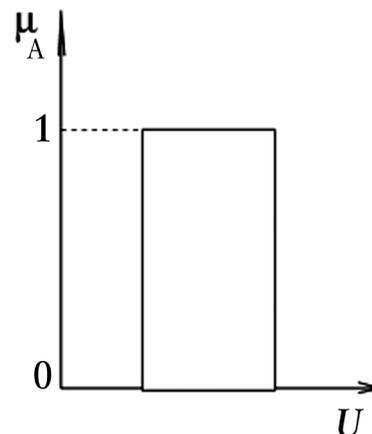
Mais particularmente, deve-se mencionar que os referidos termos linguísticos estão associados a seus conjuntos Fuzzy ou a funções de pertinência, de modo a relacionarem termos a graus de pertinência, provendo, assim, um significado numérico para o sistema em desenvolvimento (WEBER; KLEIN, 2003).

Cabe ressaltar que a Lógica Fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos e, segundo Gomilde e Gudwin, nessa lógica, o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado interpretado como um processo de composição de relações nebulosas. Nesse caso, um elemento pertence ou não a um determinado conjunto. A função  $\mu_A(x) : U \rightarrow \{0,1\}$  é chamada de função característica na teoria clássica dos conjuntos.

Dado um universo  $U$  e um elemento particular  $x \in U$ , o grau de pertinência  $\mu_A(x)$  com respeito a um conjunto  $A \subseteq U$  é dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

A teoria clássica dos conjuntos frequentemente apresenta generalizações que podem variar de diversas formas. A Figura 6 ilustra uma distribuição de pertinência para o caso de manipulação de dados com erros limitados.



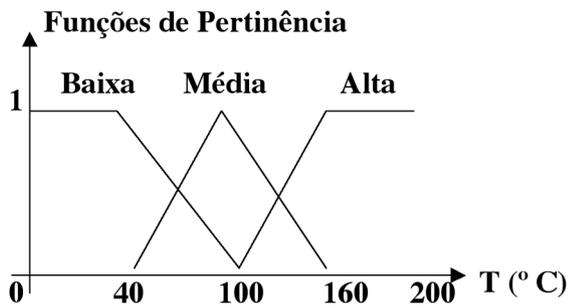
**Figura 6: Função de pertinência**

Fonte: Gomilde e Gudwin.



Nesse caso, todos os números dentro de um erro percentual terão um fator de pertinência 1, tendo todos os demais o de pertinência 0.

Assim, o fator de pertinência poderá assumir os valores 0 e 1, sendo o valor 0 identificado como a exclusão total do membro do conjunto, e o valor 1, como representante da total pertinência. Como exemplo, pode-se citar o intervalo [0, 200], tal como ilustrado na Figura 7, definindo uma variável linguística “temperatura”. Nessa aplicação, foram adotados os termos linguísticos “baixa”, “média” e “alta”.



**Figura 7: Distribuição de pertinência para a variável linguística temperatura**

Fonte: Os autores.

Neste estudo, tal como já descrita para o algoritmo A\*, a Lógica Fuzzy é utilizada em um agente inteligente a fim de determinar o menor custo de travessia de um terreno. O dito terreno é aquele mapeado e subdividido em células, tal como ilustrado pela Figura 5.

Os chamados processos de “fuzzificação” e “defuzzificação” são empregados na modelagem Fuzzy para adequar as variáveis de entrada do sistema (termos linguísticos) com sua posterior saída para atuação do agente inteligente.

De modo geral, tal como definido em Shaw e Simões (1999), pode-se dizer que a fuzzificação consiste em um mapeamento do domínio de números reais, normalmente discretos, para o domí-

nio Fuzzy, e pode representar valores linguísticos e descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada.

Com base em outro ponto de vista, pode-se afirmar que o processo de fuzzificação está intimamente relacionado a um pré-processamento de categorias ou classes de sinais de entrada, reduzindo de maneira relevante a quantidade de valores a serem processados (SHAW; SIMÕES, 1999).

Na definição da defuzzificação, tem-se que o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras Fuzzy será traduzido num valor discreto. Trata-se, nesse caso, de uma distribuição de possibilidades, de forma que, na defuzzificação, é realizada uma transformação inversa que traduz a saída do domínio Fuzzy para o domínio discreto (Shaw e Simões, 1999).

Tal metodologia Fuzzy é comparada, mais adiante, com o algoritmo de busca A\* a fim de alcançar uma solução de menor custo de travessia. A metodologia detalhada desenvolvida em cada uma das duas abordagens é descrita a seguir. Os resultados obtidos nos dois casos são apresentados e discutidos no item 6.

## 5 A navegação autônoma resolvida pelo algoritmo de busca A\* e pela Lógica Fuzzy

Neste trabalho, aborda-se o uso do algoritmo de busca A\* e da Lógica Fuzzy para resolver um problema de navegação autônoma em um terreno hipotético.

Ambas as técnicas podem ser implementadas em um veículo tipo robô explorador, capaz de atravessar o referido terreno, observando, para tal propósito, as variações de elevação do solo e os custos de locomoção associados.

Neste estudo, optou-se pela função de pertinência trapezoidal na abordagem Fuzzy. Tal como

descrito em Shaw e Simões (1999), os formatos mais frequentemente utilizados são os triângulos e trapezoides, pois podem ser gerados com certa facilidade. Cumpre notar que, conforme abordado em Shaw e Simões (1999), a projeção de outras funções de pertinência normalmente levam em conta um procedimento demasiadamente trabalhoso, uma vez que, em razão da complexidade de um sistema, atualmente, as conhecidas técnicas de redes neurais e/ou algoritmos genéticos são empregadas para a geração automática de tais funções. Todavia, como citado, neste trabalho, optou-se inicialmente pela pertinência trapezoidal em razão de sua simplicidade de implementação, não excluindo a utilização de outros tipos de pertinência.

O terreno a ser transposto nesta abordagem é representado por meio de uma matriz bidimensional de proporções 5x5, em que cada célula representa fragmentos de terreno mapeado. Este estudo leva em consideração que o veículo/robô terá um navegador GPS, o qual receberá as informações do referido terreno, compreendendo adicionalmente uma bússola eletrônica acoplada em um dispositivo de giro.

O terreno, objeto deste trabalho, foi mapeado na forma da matriz bidimensional quadrada, em que cada célula representa uma determinada elevação do mesmo terreno. Tais células foram mapeadas como ilustra a Figura 8.

	1	2	3	4	5
A	A <sup>1</sup> 2	A <sup>2</sup> 1	A <sup>3</sup> 1	A <sup>4</sup> 0	A <sup>5</sup> 0
B	B <sup>1</sup> 1	B <sup>2</sup> -2	B <sup>3</sup> 1	B <sup>4</sup> 2	B <sup>5</sup> 0
C	C <sup>1</sup> -1	C <sup>2</sup> 0	C <sup>3</sup> 1	C <sup>4</sup> 2	C <sup>5</sup> 1
D	D <sup>1</sup> 1	D <sup>2</sup> 1	D <sup>3</sup> 0	D <sup>4</sup> 2	D <sup>5</sup> 1
E	E <sup>1</sup> 0	E <sup>2</sup> 1	E <sup>3</sup> 2	E <sup>4</sup> 3	E <sup>5</sup> 3

**Figura 8: Terreno mapeado para travessia do agente inteligente ora proposto**

Fonte: Os autores.

Tal mapeamento está distribuído da seguinte forma:

- Verticalmente – com as letras do alfabeto, iniciando em “A” e terminando em “E”;
- Horizontalmente – com números iniciando em 1 e terminado em 5.

A intersecção entre a linha e a coluna dá origem ao nome da célula. O número expresso em cada célula representa a elevação total de seu centro. Exemplificando, tem-se que tais números se referem a:

- -2 = 60 cm abaixo do nível do mar;
- -1 = 30 cm abaixo do nível do mar;
- 0 = nível do mar;
- 1 = 30 cm acima do nível do mar;
- 2 = 60 cm acima do nível do mar, e
- 3 = 90 cm acima do nível do mar.

Mais particularmente, pode-se dizer que um resultado negativo representa uma depressão ou descida, ao passo que um resultado positivo representa uma subida no terreno mapeado.

O algoritmo de busca A\* foi escolhido por fornecer o caminho de menor custo a ser percorrido pelo agente inteligente. O custo de deslocamento envolvido nesta abordagem leva em consideração seis parâmetros, lembrando que a bússola eletrônica sempre aponta para o leste após cada movimentação do agente. Tais parâmetros são dados por:

- Reto – equivale a um custo de 1 e representa o deslocamento em ângulos retos (0°, 90°, 180°, 270°) para células que possuem o mesmo nível da célula atual;
- Reto diagonal – equivale a um custo de 1,25 e representa o deslocamento em ângulos de 45°, 135°, 225° e 315° para células que possuem o mesmo nível da célula atual;



- Subida – equivale a um custo de 1,25 e representa o deslocamento em ângulos retos ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ) para células que possuem um nível acima da célula atual;
- Subida diagonal – equivale a um custo de 1,50 e representa o deslocamento em ângulos de  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  e  $315^\circ$  para células que possuem um nível acima da célula atual;
- Descida – equivale um de custo de 0,50 e representa o deslocamento em ângulos retos ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ) para células que possuem um nível abaixo da célula atual, e
- Descida diagonal – equivale a um custo de 0,75 e representa o deslocamento em ângulos de  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  e  $315^\circ$  para células que possuem um nível abaixo da célula atual.

O terreno utilizado na abordagem Fuzzy é aquele apresentado neste trabalho. Para podermos comparar os resultados apresentados no algoritmo de busca  $A^*$  e na Lógica Fuzzy, os termos linguísticos distância e elevação equivalem respectivamente ao custo da movimentação e ao nível do terreno utilizado neste algoritmo de busca.

Os seguintes termos linguísticos foram elaborados para as variáveis de entrada:

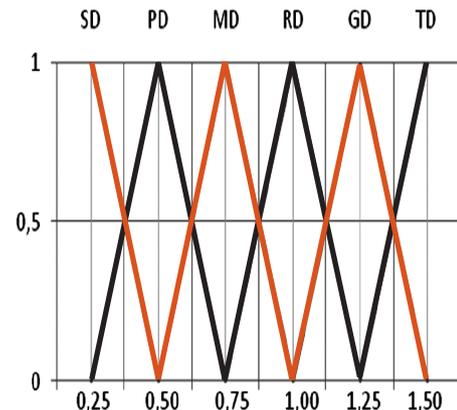
**- Termo distância:**

- SD – sem distância e equivale a 0,25;
- PD – pouca distância e equivale a 0,50;
- MD – media distância e equivale a 0,75;
- RD – regular distância e equivale a 1;
- GD – grande distância e equivale a 1,25, e
- TD – total distância e equivale a 1,50 ou superior.

A Figura 9 ilustra a distribuição de pertinência para o termo linguístico distância.

**- Termo elevação:**

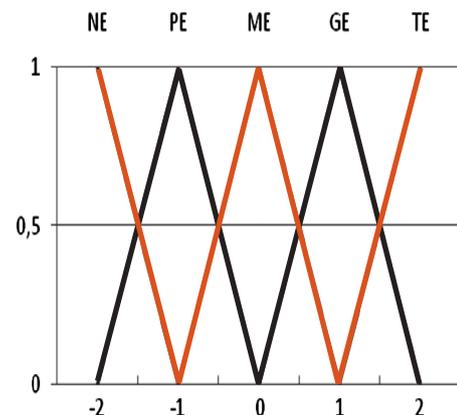
- NE – nenhuma elevação e equivale a -2;
- PE – pouca elevação e equivale a -1;
- ME – média elevação e equivale a 0;
- GE – grande elevação e equivale a 1, e
- TE – total elevação e equivale a 2 ou superior.



**Figura 9: Distribuição de pertinência para a distância**

Fonte: Os autores.

A Figura 10 mostra a distribuição de pertinência para a elevação do terreno.



**Figura 10: Distribuição de pertinência para o termo elevação**

Fonte: Os autores.

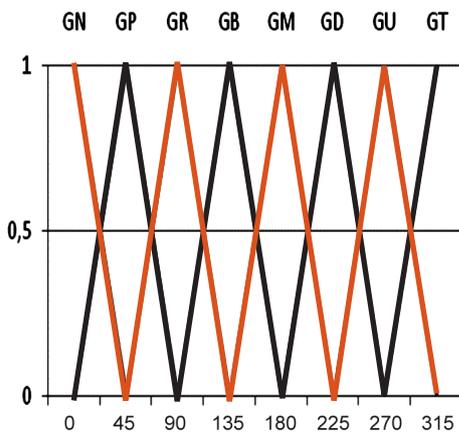
O seguinte termo linguístico foi elaborado para a variável de saída, representando a quantidade de graus que o veículo robô, ou agente inteligente, deverá virar. Nota-se que a búss-

la eletrônica sempre aponta para o leste após cada movimentação.

**- Termo de saída:**

- GN – gira nada e equivale a 0°;
- GP – gira pouco e equivale a 45°;
- GR – gira regular e equivale a 90°;
- GB – gira bastante e equivale a 135°;
- GM – gira mais e equivale a 180°;
- GD – gira demais e equivale a 225°;
- GU – gira muito e equivale a 270°; e
- GT – gira total e equivale a 315°.

A Figura 11 mostra a distribuição de pertinência para a variável de saída do controle Fuzzy empregado neste trabalho.



**Figura 11: Distribuição de pertinência para a saída do sistema Fuzzy**

Fonte: Os autores.

As funções de pertinência e sua distribuição, durante o chamado processo de fuzzificação da família trapezoidal, estão representadas a seguir para a distância e a elevação:

- Distância:

$$0,25 \leq \text{DIST} \leq 0,50 = \frac{\text{DIST} - 0,25}{0,25} \text{SD} + \frac{0,50 - \text{DIST}}{0,25} \text{PD}$$

$$0,50 < \text{DIST} \leq 0,75 = \frac{\text{DIST} - 0,50}{0,25} \text{MD} + \frac{0,75 - \text{DIST}}{0,25} \text{SD}$$

$$0,75 < \text{DIST} \leq 1 = \frac{\text{DIST} - 0,75}{0,25} \text{RD} + \frac{1 - \text{DIST}}{0,25} \text{MD}$$

$$1 < \text{DIST} \leq 1,25 = \frac{\text{DIST} - 1}{0,25} \text{GD} + \frac{1,25 - \text{DIST}}{0,25} \text{RD}$$

$$1,25 < \text{DIST} \leq 0,50 = \frac{\text{DIST} - 1,25}{0,25} \text{TD} + \frac{1,50 - \text{DIST}}{0,25} \text{GD}$$

- Elevação:

$$-0,2 \geq \text{ELEV} \geq -1 = \frac{(\text{ELEV} - (-2))}{1} \text{NE} + \frac{(-1 - \text{ELEV})}{1} \text{PE}$$

$$-1 > \text{ELEV} \geq 0 = \frac{(\text{ELEV} - (-1))}{1} \text{ME} + \frac{(0 - \text{ELEV})}{1} \text{NE}$$

$$0 < \text{ELEV} \leq 1 = \frac{(\text{ELEV} - 0)}{1} \text{GE} + \frac{(1 - \text{ELEV})}{1} \text{ME}$$

$$1 < \text{ELEV} \leq 2 = \frac{(\text{ELEV} - 1)}{1} \text{TE} + \frac{(2 - \text{ELEV})}{1} \text{GE}$$

A Tabela 1 ilustra o conjunto de regras adotado para o processo de defuzzificação das variáveis de entrada, considerando a movimentação do agente inteligente em passos de 45°.

**Tabela 1: Conjunto de regras utilizado na modelagem Fuzzy durante o processo de defuzzificação**

Elevação \ Distância	Distância				
	PD	MD	RD	GD	TD
NE	GN	GN	GN	GN	GT
PE	GN	GP	GN	GN	GT
ME	GN	GN	GN	GN	GP
GE	GU	GN	GR	GN	GP
TE	GN	GT	GU	GN	GP

Fonte: Os autores.

A Tabela 2 ilustra o conjunto de regras adotado para o processo de defuzzificação das variáveis de entrada, considerando a movimentação do agente inteligente apenas em ângulos retos.



**Tabela 2: Conjunto de regras utilizado na modelagem Fuzzy, durante o processo de defuzzificação, para a movimentação em ângulos retos**

Elevação \ Distância	PD	RD	TD
EN	GR	GR	GU
EM	GR	GM	GU
EB	GR	GM	GU
EP	GM	GR	GR
ER	GU	GU	GR
EZ	GU	GN	GU
ED	GN	GR	GN
EG	GN	GR	GN
EU	GU	GR	GR
ET	GU	GR	GR

Fonte: Os autores.

## 6 Resultados obtidos

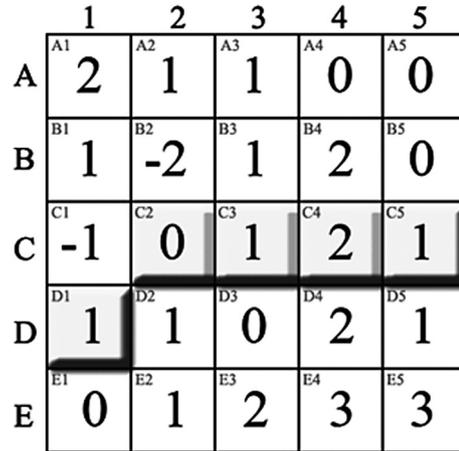
A seguir serão apresentados os resultados preliminares obtidos a partir da varredura do algoritmo de Busca A\* e da varredura da Lógica Fuzzy, como modelados nos itens anteriores.

Um primeiro estudo fez uso do algoritmo de busca A\* e se deu a partir do caminho iniciado na célula D1, atravessando o referido terreno e chegando até a célula C5. Nota-se, pela Figura 12, que o caminho percorrido pelo agente.

Com base na varredura do algoritmo A\* levou em consideração a saída da célula D1 e sua passagem pelas células C2, C3 e C4 até chegar a seu destino C5.

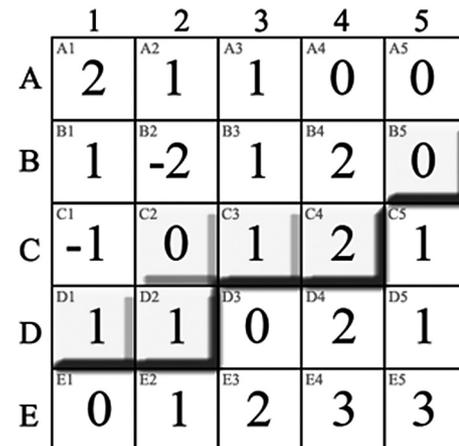
No tocante à abordagem Fuzzy, o cálculo do caminho percorrido foi baseado no mesmo princípio utilizado pelo algoritmo de busca A\*, porém partindo da célula D1 e caminhando até a célula B5. A Figura 13 mostra os resultados alcançados com a metodologia Fuzzy.

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados obtidos a partir das duas técnicas de inteligência artificial, considerando que o agente inteligente pode mover-se em ângulos de passo de 45°. Neste caso, a análise de ambas as técnicas foi fei-



**Figura 12: Caminho percorrido pelo agente inteligente no terreno mapeado, por meio do Algoritmo de busca A\***

Fonte: Os autores.

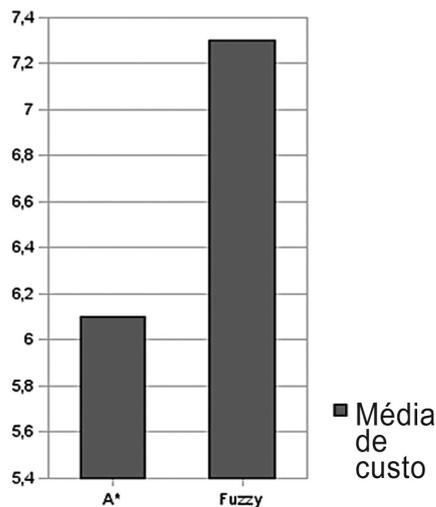
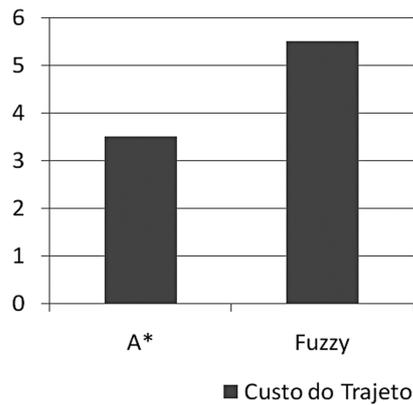


**Figura 13: Caminho percorrido pelo agente inteligente no terreno mapeado, por meio da Lógica Fuzzy**

Fonte: Os autores.

ta a partir do custo obtido durante uma travessia do terreno. A Figura 14 também mostra os valores obtidos a partir da varredura do algoritmo de busca A\* e da lógica Fuzzy, considerando, porém, a movimentação do agente inteligente apenas em ângulos retos. Para tal discussão, foram feitas duas travessias pelo terreno e analisados os valores médios para os custos de travessia envolvidos.

A Figura 14 mostra uma comparação entre as duas abordagens durante a travessia do terreno, considerando um trajeto similar para ambos os



**Figura 14: Resultados obtidos pelas técnicas A\* e Lógica Fuzzy, considerando a travessia do terreno pelo agente inteligente em ângulos retos (duas travessias) e em uma movimentação em passos de 45° (uma travessia)**

Fonte: Os autores.

casos. É possível observar que o algoritmo de busca A\* percorreu um caminho substancialmente menor, em ambos os casos, isto é, com menor custo, em relação àquele escolhido pelo agente Fuzzy, quer para travessia apenas em ângulos retos, quer para aquela orientada apenas em passos de 45°.

## 7 Considerações finais

De acordo com os resultados preliminares obtidos neste trabalho, verificou-se, a partir da

varredura do algoritmo de busca A\*, que o agente desenvolveu a travessia do terreno em um custo substancialmente inferior, quando comparado à metodologia Fuzzy, para resolver o problema da navegação autônoma.

O custo total do trajeto feito a partir do algoritmo de busca A\* foi de 3,5, proporcionando o menor custo possível entre os trajetos que poderiam ser realizados para a movimentação do agente em passos de 45°. Para a movimentação do agente inteligente apenas em ângulos retos, notou-se, de maneira análoga, um custo médio menor para o algoritmo A\*, quando comparado à travessia baseada na Lógica Fuzzy.

Os resultados iniciais, advindos deste estudo, mostram que a abordagem do algoritmo A\* ainda se mostra mais vantajosa, ante a modelagem Fuzzy, para cada caso de movimentação do agente. Todavia, verificou-se que, caso ocorra um detalhamento maior do terreno, haverá necessidade de um estudo mais criterioso quanto às regras empregadas em ambas as técnicas.

Deve-se salientar que alguns ajustes foram efetuados na tabela de regras para o processo de defuzzificação, uma vez que o terreno, conforme proposto, deveria ser detalhado em um número maior de níveis para a abordagem Fuzzy.

Pode-se afirmar que, conforme os resultados iniciais encontrados para ambas as técnicas, tais soluções poderiam ser implementadas para auxiliar no processo de decisão em um problema de navegação autônoma. Deve-se ressaltar, porém, que, nesse tipo de aplicação, o método da Lógica Fuzzy necessita de um maior detalhamento do terreno mapeado, o que acarreta maior demanda de tempo para seu desenvolvimento e implementação, se comparado ao algoritmo de busca A\*. Nesse sentido, outros estudos e investigações devem ser realizados a fim de determinar os melhores parâmetros e ajustes para cada solução apresentada.



Finalmente, o estudo de tais técnicas e os custos envolvidos na travessia de um terreno podem ser avaliados com vistas a sua implementação em *hardware* para o agente inteligente, considerando, com base nos custos estimados, as demandas e os esforços computacionais associados a cada necessidade de movimentação, tanto de maneira mais precisa – como ocorre em ângulos de passo de 45°, ou inferiores – quanto para os casos em que é prevista uma movimentação mais limitada para o dito agente.

### Autonomous navigation of an intelligent agent: a comparative study using Fuzzy logic and A\* search algorithm

This paper presents a comparative study about the Fuzzy logic and A\* search algorithm implementation, in an intelligent agent, in order to resolve problems of routes in autonomous navigation. More particularly, this work compares both techniques in order to evaluate the cost of crossing of a hypothetical land, considering the movement of the intelligent agent only at right angle and at step of 45°. Preliminary results related to the search algorithm and the Fuzzy logic show the viability of this approach.

**Key words:** Artificial intelligence. Autonomous navigation. Fuzzy logic. Search algorithm.

## Referências

- FERNANDES, A.M. da R. *Inteligência artificial aplicada à saúde*. 1. ed. Florianópolis: Visual Books, 2004.
- GOMILDE, F.C.A.; GUDWIN, R.R. *Modelagem, controle, sistemas e Lógica Fuzzy*. Campinas.
- HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- LEMOS, A.M.N.; TORRES, F.T. *Navegação autônoma de veículos terrestres*. Belém, 2003.
- PLANTULLO, V.L. *Teoria geral da administração: de Taylor às redes neurais*. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV Editora, 2002.
- RUSSEL, S.; NORVIG, P. *Artificial intelligence a modern approach*. 1. ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 1995.
- SHAW, I.S.; SIMÕES, M.G. *Controle e modelagem Fuzzy*. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.
- Site Internet. Disponível em: <http://www.state.gov>. Acesso em: 17 nov. 2008.
- Site Internet. Disponível em: <http://www.electrolux.com.br>. Acesso em: 22 out. 2008.
- STAHL, C.W. *Accumulated surfaces & least-cost paths: GIS modeling for autonomous ground vehicle (AGV) navigation*. Blacksburg, 2005.
- WEBER, L.; KLEIN, P.A.T. *Aplicação da Lógica Fuzzy em software e hardware*. 1. ed. Canoas: Ulbra, 2003.
- ZADEH, L.A. *Fuzzy Sets. Information and control*. Nova York, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

Recebido em 6 dez. 2008 / aprovado em 16 jan. 2009

#### Para referenciar este texto

PINHEIRO, E. et al. Navegação autônoma de um agente inteligente: um estudo comparativo usando Lógica Fuzzy e Algoritmo de Busca A\*. *Exacta*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 87-98, 2009.