

# Um modelo de integração de dados e tomada de decisão para veículos autônomos

Rodrigo de Sousa Pissardini<sup>1</sup> e Edvaldo Simões da Fonseca Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [pissardini@usp.br](mailto:pissardini@usp.br)

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [edvaldoj@usp.br](mailto:edvaldoj@usp.br)

**Resumo** – Esta pesquisa descreve o conceito de Grade de Prioridades, um mecanismo para integração de dados e tomada de decisão para veículos autônomos, no contexto dos carros sem motorista. A Grade é um recurso utilizado para obter e gerenciar dados de sensores heterogêneos (dados de colisão, sinalização vertical/horizontal e outros recursos dos sistemas de transportes), vinculá-los a uma Hierarquia de Prioridades e aplicar algoritmos para calcular, como resultado, os dados de orientação e velocidade do veículo, que serão enviados para os atuadores. O artigo descreve os conceitos básicos da Grade de Prioridades, sua estrutura, método de desenvolvimento e possíveis modificações para veículos autônomos.

**Palavras-chave:** Navegação autônoma, carros sem motorista., sistemas inteligentes de transporte.

**Abstract** – This research describes the concept of Grid of Priorities, a mechanism for data integration and decision making for autonomous vehicles, in the context of driverless car. The Grid is a resource to obtain and manage data from heterogeneous sensors (data of collision, vertical/horizontal signaling, and other sources from transportation systems), linking them to a Priority Hierarchy and applying algorithms to obtain, as result, the data of direction and speed of the vehicle, that will be sent to actuators. The article describes the basic concepts of Grid of Priorities, its structure, method development and possible changes for use in autonomous car.

**Keywords:** Autonomous navigation, driverless car. intelligent transportation systems.

## I. INTRODUÇÃO

Carros autônomos, carros robóticos, carros sem motorista, veículos autônomos de transporte terrestre (VAT) e outros nomes, definem um tipo de veículo, de transporte de seres humanos ou bens, que prescinde do condutor humano, guiado por um sistema computacional que combina sensores e atuadores para interagir com o ambiente e com o sistema de transportes. Trata-se de uma área de pesquisa em expansão com diversos benefícios esperados, na qual montadoras de veículos, grupos acadêmicos e organizações diversas têm investido pesquisa e recursos [1], [2] e [3].

Independente da nomenclatura utilizada, considera-se que um carro autônomo é um mecanismo robótico que necessita atender a exigentes requisitos de segurança e interagir com o ambiente como um condutor

humano comum faria [3]. Para isto, o veículo deve ser equipado com componentes e sistemas que permitam:

- Desvio de possíveis obstáculos (elementos naturais ou artificiais, dinâmicos ou estáticos do ambiente);
- Planejamento de rota;
- Reconhecimento de sinalização vertical e horizontal de trânsito;
- Comunicação com outros veículos – autônomos ou não - e com a infraestrutura da via de transportes;
- Posicionamento absoluto e relativo; e
- Controle e guiagem automática baseados nos tópicos acima citados.

Este artigo apresenta um modelo chamado de Grade de Prioridades que tem o objetivo de integrar dados obtidos de sensores heterogêneos (capazes de obter dados de possíveis obstáculos, reconhecimento de sinalização, comunicação e posicionamento) associados ao veículo para descrever o cenário de operação atual de um carro autônomo. Baseado nestes dados, o modelo permite a aplicação de algoritmos apropriados para definir qual o movimento recomendado que o veículo deve realizar. Tal movimento é descrito em termos de ângulo de orientação e velocidade com os quais o veículo deve se deslocar. O modelo proposto pode ser utilizado como um mecanismo central de um sistema de tomada de decisão de navegação ou como um mecanismo auxiliar para sistemas de navegação mais complexos já existentes na literatura.

## II. MODELO DE GRADE DE PRIORIDADES

Esta seção apresenta o Modelo de Grade de Prioridades. A primeira parte descreve o conceito de Hierarquia de Prioridades, uma estrutura para padronizar e hierarquizar os dados recebidos e processados por um veículo autônomo, independentemente de sua origem. Na segunda parte, descreve-se o modelo de Grade propriamente dito, com sua estrutura, os algoritmos associados e um exemplo didático de uso.

### A. Hierarquia de Prioridades: padronizando os dados

Considere um veículo autônomo qualquer, munido de um conjunto de sensores de colisão, posicionamento e comunicação. Independentemente do tipo, qualidade, origem e funcionamento específico de cada sensor, todo sensor deve ser capaz de oferecer suas medições sob a forma:

---

PISSARDINI, R. S.; FONSECA JR, E. S.

*Um modelo de integração de dados e tomada de decisão para veículos autônomos*

©Revista Ciência e Tecnologia, Campinas, v. 20, n. 37, p. 1 - 10, jul./dez. 2017 - ISSN: 2236-6733

$$s_i = (v, p, i)$$

Na qual, para uma determinada medição  $s_i$  de um sensor:

- $v$ : é o valor de variável fornecida pelo sensor;
- $p$ : é o nível de prioridade do dado (conforme a Hierarquia de Prioridades –Tabela 1- a seguir) e;
- $i$ : uma marca temporal (que define quando o dado foi obtido).

A Hierarquia de Prioridades é uma tabela (Tabela 1) que estabelece qual a prioridade deve ser associada a

cada medição obtida dos sensores para posterior tratamento por parte da Grade de Prioridades. Ela busca oferecer uma padronização simplificada de modo a sistematizar os eventos relacionados a uma situação de trânsito no qual um veículo pode participar, considerando as características do sistema de transportes terrestres. A tabela considera um ambiente plenamente autônomo, no qual as tecnologias envolvidas são mais confiáveis do que a condução humana [4]. No entanto, os valores das prioridades da hierarquia podem ser modificados de forma conveniente sem que se perca a estrutura da Grade de Prioridades desde que a importância relativa seja mantida.

Tabela 1 - Níveis de prioridades utilizados na Grade de Prioridades. Fonte: Os autores.

Valor	Prioridade	Características
0	Sem prioridade	Dados que não impactam o processo de navegação, que não geram fatores de risco e que não necessitam ser tratados no momento de sua aquisição, mas apenas quando não houver dados mais prioritários para tratamento (desde que atendidas as condições que possibilitem a sua realização). Exemplo: atualizações de sistema.
1	Planejamento	Prioridade padrão. Dados que sejam baseados em planejamento de rota ou em uma expectativa preliminar do ambiente a ser navegado. Em geral, são adquiridos de uma base de dados pré-existente por meio de um sistema de telecomunicação, porém o veículo pode ser dotado de uma base de dados própria.
2	Controle humano	Prioridade associada às ações realizadas pelo condutor humano no controle do veículo.
3	Comunicação inter-veículos	Prioridade associada aos dados gerados pela comunicação entre veículos (autônomos ou não).
4	Infraestrutura de transportes primária – não regulamentada	Prioridade associada aos dados obtidos por tecnologias que não estão submetidas e padronizadas à legislação de transportes (ou trânsito) vigente. Exemplos incluem a aquisição de dados de posicionamento por satélites.
5	Infraestrutura de transportes secundária – regulamentada estática	Prioridade associada a dados estáticos (que não variam no tempo) obtidos por tecnologias padronizadas de acordo com o sistema de transporte. Exemplos incluem sinalização horizontal e vertical da via.
6	Infraestrutura de transportes terciária – regulamentada dinâmica	Prioridade associada a dados dinâmicos (que variam no tempo) obtidos por tecnologias padronizadas de acordo com o sistema de transportes. Exemplos incluem sistemas de velocidade variável, sinalização dinâmica e outras.
7	Colisão	Nível de maior prioridade; é associado aos dados vinculados à possibilidade de colisão com objetos estáticos e dinâmicos do ambiente. Dados deste nível podem ser adquiridos pelo uso de sensores ultrassônicos, sensores <i>laser</i> , sensores infravermelhos, câmeras e outros.

A prioridade de uma medição é determinada pela natureza da medição, pelo seu sensor de origem e em como será utilizado pelo sistema. Desta forma, a prioridade de uma medição é definida no projeto do veículo e não se modifica posteriormente. Considera-se que uma medição é associada a uma determinada prioridade apenas se não puder ser tratada plenamente por um nível inferior.

Por padrão, quando há dois ou mais dados para uma mesma situação de trânsito, opta-se, em primeiro lugar, por aqueles mais recentes. Se os dados são obtidos para

um mesmo intervalo de tempo, prioriza-se o dado mais restritivo (conforme a Grade de Prioridades descrita em 2.2). Se ainda assim os dados são iguais, opta-se por aquele de maior prioridade.

### B. Grade de Prioridades

Grade de Prioridades é a estrutura de dados central proposta para integração de dados e tomada de Decisão em veículos autônomos. Ela é baseada livremente sobre propostas de algoritmos *Bug*, em especial, as estruturas propostas por [5] e [6]. Seu objetivo é modelar a situação

PISSARDINI, R. S.; FONSECA JR, E. S.

*Um modelo de integração de dados e tomada de decisão para veículos autônomos*

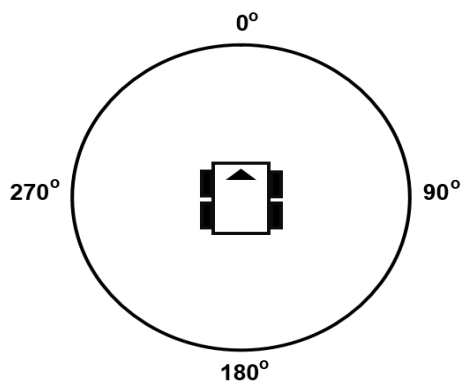
©Revista Ciência e Tecnologia, Campinas, v. 20, n. 37, p. 1 - 10, jul./dez. 2017 - ISSN: 2236-6733

de trânsito presente do veículo sob o enfoque do sistema de transportes.

### B.1. Criação da Grade

A Grade de Prioridades é criada como uma circunferência bidimensional (Figura 1), que possui seu centro equivalente ao centro geométrico do veículo, e que planifica a região (vertical e horizontal) adjacente ao veículo. A circunferência é criada com um raio  $r$  igual ao maior valor de comprimento do alcance obtido pela combinação de todos sensores integrados ao veículo. A partir deste valor, pode-se calcular o diâmetro da circunferência ( $\emptyset = 2r$ ) e o comprimento ( $c = 2\pi r$ ) da Grade. Considera-se que a região imediatamente à frente do veículo possui ângulo  $0^\circ$  e os ângulos progridem em sentido horário.

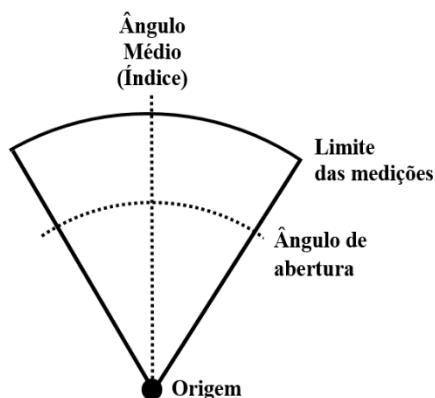
Figura 1 - Modelo de Grade de Prioridades



Fonte: os autores.

Posteriormente segmenta-se a circunferência em um conjunto de regiões cônicas homogêneas (i.e., com o mesmo ângulo de abertura) (Figura 2). Cada região cônica origina-se na origem da circunferência e encerra-se nos limites desta.

Figura 2 – Região Cônica da Grade de Prioridades



Fonte: os autores.

Uma região cônica  $r$  é descrita como:

$$r_i = (d, p, t)$$

Onde:

- $i$ : é o índice da região. O índice é igual ao ângulo médio da região em relação à origem da circunferência.
- $d$ : é a distância livre (em metros) que o veículo pode navegar para aquela região (o valor padrão é 0.0);
- $p$ : o nível de prioridade da última medição que atualizou a respectiva seção (o nível- padrão é igual a 0 – i.e., zero) e;
- $t$ : o marcador de tempo da última atualização da seção.

A escolha do valor do ângulo da abertura das seções cônicas é feita no projeto inicial do veículo e não se modifica posteriormente. O valor escolhido define a densidade da Grade, a precisão oferecida para descrever os bloqueios de cada região, o custo computacional e tempo de processamento envolvido nas operações de Grade. Por padrão e por testes preliminares, considera-se que uma abertura de  $1^\circ$  (que gera uma Grade de 360 posições) é adequada para as atividades básicas a serem realizadas sobre a Grade sem perda de informação.

### B.2 Operações sobre a grade de prioridades

As operações sobre a Grade de Prioridades iniciam-se com o estabelecimento de uma missão, i.e., as coordenadas do lugar para onde o veículo deve ir. Define-se navegação como a capacidade de um veículo reconhecer sua posição atual e se movimentar, de forma contínua, para o lugar estabelecido pela sua missão. Desta forma, podemos definir uma missão sob a forma  $m = (x_m, y_m)$ , onde  $x_m, y_m$  são as coordenadas do lugar da missão. Também podemos definir a posição atual do veículo como  $p_{atual} = (x_{atual}, y_{atual})$ , onde  $x_{atual}, y_{atual}$  são as coordenadas atuais do veículo.

Ainda que haja diferentes formas de realizar um processo de navegação, a literatura cita três grandes modelos típicos de possível navegação [7][8]:

- **Navegação reativa:** o veículo segue diretamente para sua missão, desviando-se dos possíveis obstáculos.
- **Navegação deliberativa:** o veículo realiza somente ações pré-determinadas (e.g. uma rota pré-estabelecida).
- **Navegação híbrida:** o veículo combina o desvio de colisão com ações de planejamento.

Sob o enfoque da Grade, no caso de navegação reativa, pode-se estabelecer a missão proposta será utilizada como entrada da função de Grade (Algoritmo 1) (nestes algoritmos, por conveniência, os símbolos { } estabelecem os limites dos comentários).

---

**Algoritmo 1: Função Principal (Reativo)**

---

**Entrada:** missão do usuário  $m$

$p$  = posição atual do veículo *{obtida de sensores}*  
orientação = 0.0  
distância = 0.0  
**enquanto**  $p \neq m$  **faça**  
    orientação, distância = Grade ( $m, p$ )  
    **repasse aos atuadores** orientação, distância  
     $p$  = posição atual do veículo *{obtida dos sensores}*  
**fim**

---

Nos casos de navegação deliberativa e híbrida, o veículo deve ser capaz de obter, entre sua posição atual e a missão planejada, um conjunto de coordenadas que permitam compor uma rota. Algoritmos de geração e seleção de rota e menor caminho, assim como os métodos utilizados para inserção no veículo não são do escopo deste trabalho, mas podem ser vistas mais detalhadamente em [7]. No entanto, independentemente destas características, sob o enfoque da Grade, pode-se considerar que uma rota  $B$  pode ser dada sob a forma:

$$B = (b_0 = p_{atual}, b_1, b_2, \dots, b_{max} = m)$$

Na qual:

$$b_i = (x_{b_i}, y_{b_i})$$

Onde,  $b_i$  é um vértice da rota, e  $x_{b_i}, y_{b_i}$  são as coordenadas associadas a este vértice. De forma contínua, então, o vértice  $b_i$  mais atual deverá ser repassado para a função de Grade no lugar de  $m$  (Algoritmo 2).

---

**Algoritmo 2: Função Principal (Deliberativo e Híbrido)**

---

**Entrada:** missão do usuário  $m$  e rotas planejadas  $B$

$p$  = posição atual do veículo *{obtida de sensores}*  
orientação = 0.0  
distância = 0.0  
 $i = 0$   
**enquanto**  $p \neq m$  **faça**  
    **enquanto**  $p \neq b_{i+1}$  **faça**  
        orientação, distância = Grade ( $b_i, p$ )  
    **repasse aos atuadores** orientação, distância  
     $p$  = posição atual do veículo  
    **fim**  
     $i = i + 1$   
**fim**

---

Ao ser chamada, a função de Grade e Prioridades realiza as operações descritas nos algoritmos 3 e 4.

Deve-se considerar que, para o algoritmo ser funcional, é necessário que um conjunto de medições  $C$  de dados de colisões, de sinalização de transportes e de comunicação com outros elementos do ambiente esteja disponível. Estes dados devem possuir a seguinte estrutura:

$$c_i = (d, az, l, p, t)$$

Onde para uma medição específica  $c_i$ :

- $d$ : distância entre o carro robótico e o bloqueio;
- $az$ : ângulo entre o carro robótico e o centro do bloqueio;
- $l$ : ângulo de largura do bloqueio na Grade;
- $p$ : prioridade do bloqueio e;
- $t$ : marcador de tempo no qual o bloqueio foi obtido.

---

**Algoritmo 3: Grade ( $m, p$ )**

---

**Entrada:** missão  $m$  e posição atual do veículo  $p$

**Saída:** [orientação, distância] recomendados para ação

*{Etapa 1. cria a estrutura da grade de prioridades}*

**para**  $i = 0$  **até**  $i$  **igual a**  $r_{max}$  **passo 1 faça**  
     $r_i(d) = 0.0$   
     $r_i(p) = 0$   
     $r_i(t) = 0.0$   
**fim**

*{Etapa 2. distância e ângulo entre posição atual e missão}*

$$d = \sqrt{(x_m - x_{atual})^2 + (y_m - y_{atual})^2}$$
$$a = \text{atan2}((y_m - y_{atual}), (x_m - x_{atual})) * 180/\pi$$

*{Preenche região mais próxima do ângulo calculado com o valor da distância}*

**para**  $i = 0$  **até**  $i$  **igual a**  $r_{max}$  **passo 1 faça**  
    **se**  $a \geq i$  **e**  $a < i + 1$  **então**  
         $r_i(d) = d$  *{distância}*  
         $r_i(p) = 1$  *{nível de prioridade}*  
         $r_i(t) = \text{tempo atual}$  *{obtida do sensor}*  
    **fim**  
**fim**

*{Etapa 3. criação da janela de navegação}*

**para**  $i = (a - 90)/2$  **até**  $i < (a - 90)/2 + 90$  **passo 1 faça**  
     $r_i(d) = d$   
     $r_i(p) = 1$   
     $r_i(t) = \text{tempo atual}$   
**Fim**

---

*{Etapa 4. associação de dados de sensores à Grade}*

$C$  = associe todas as medições de bloqueio ou colisão dos sensores disponíveis

```
para cada medição  $c$  em  $C$  faça
  para  $i=c(az) - k$  até  $i < c(az + c(l)/2)$  passo 1 até
    se  $c(t) > r_i(t)$  então
       $r_i(d) = c(d)$  {distância}
       $r_i(p) = c(p)$  {nível de prioridade}
       $r_i(t) = c(t)$  {obtida do sensor}
    senão
      se  $c(t) = r_i(t)$  e  $c(d) < r_i(d)$  então
         $r_i(d) = c(d)$  {distância}
         $r_i(p) = c(p)$  {nível de prioridade}
         $r_i(t) = c(t)$  {obtida do sensor}
      senão
        se  $c(t) = r_i(t)$  e  $c(d) < r_i(d)$  e  $c(p) > r_i(p)$  então
           $r_i(d) = c(d)$  {distância}
           $r_i(p) = c(p)$  {nível de prioridade}
           $r_i(t) = c(t)$  {obtida do sensor}
        fim
      fim
    fim
  fim
fim
```

*{procurar distância e orientação para movimento}*

```
para  $i = 0$  até  $i < 360$  passo 1 faça
  distancias[i] = alcance máximo dos sensores do veículo
  para  $j \leftarrow 0$  até  $j$  igual a 90 passo 1 faça
    se  $r_{i+j}(d) < distancias[i]$  então
       $distancias[i] = r_{i+j}(d)$ 
    fim
  fim
fim
```

*{define os valores de distância e orientação}*

$maxDistancia = 0.0$   
 $maxOrientacao = 0.0$

```
para  $i = 0$  até  $i < 360$  passo 1 faça
  se  $distancias[i] > maxDistancia$  então
     $maxDistancia = distancias[i]$ 
     $maxOrientacao = i$ 
  fim
fim
```

$distancia = maxDistancia$   
 $orientacao = DiferencaAngulo(0.0, maxOrientacao + 45) * \pi / 180$  {algoritmo 4}

**retorne** distância, orientacao

---

---

#### Algoritmo 4: DiferencaAngulo ( $a$ , $b$ )

---

**Entrada:** posição  $a$  (em graus) e posição  $b$  (em graus)  
**Saída:** diferença de ângulo entre posição  $a$  e posição  $b$

```
diff =  $180 - ||b - a| \bmod 360| - 180|$ 
se  $b > 180$  e  $a < 360$  então
  | retorne - diff
senão
  | retorne diff
fim
```

---

A primeira etapa da construção da Grade de Prioridades consiste em organizar sua estrutura e inicializar valores que não permitam ao veículo mover-se (“estado de segurança”). Estes valores são, por padrão,  $d = 0.00$ ,  $p = 0$  e  $t = 0$  para todas as regiões da Grade. O estado de Segurança é sempre assumido no início de cada ciclo de uso da Grade ou em situações nas quais o veículo deva permanecer parado.

A segunda etapa da construção da Grade de Prioridades tem como objetivo determinar as regiões da Grade que podem ser associadas à rota planejada. O processo envolve obter a distância e o ângulo de orientação entre a posição atual do veículo e o próximo local do ambiente a ser atingido. A região com o índice mais próximo ao ângulo de orientação terá sua distância atualizada com o valor de distância calculada e sua prioridade assumirá o valor 1 e a variável de tempo será atualizada com a data dos dados de planejamento.

A terceira etapa envolve a construção da Janela de Navegação: como um veículo não é capaz de navegar por uma única região da Grade (exceto em Grades com baixíssima densidade), obtém-se a quantidade de regiões que o veículo deve ocupar para se movimentar, considerando-se a região de planejamento como o eixo de orientação central. Estas regiões são obtidas pela combinação do esterçamento que o veículo pode realizar no momento atual, com o esterçamento que o veículo pode realizar se considerar o planejamento como orientação central. As seções compreendidas neste limite recebem o mesmo valor da distância da região de planejamento e prioridade igual a 1.

A quarta etapa da construção da Grade de Prioridades consiste em obter os dados dos sensores de restrição (de comunicação e colisão) no intervalo entre as prioridades 2 e 7, integrando-as à Grade com o objetivo de impor liberações e restrições de modo a refinar o planejamento realizado pelo veículo e estabelecer o movimento recomendado ao veículo. Para isto deve-se criar um conjunto com todas as medições de restrição disponíveis ao veículo em um determinado instante do tempo. Independentemente da origem dos dados, eles devem permitir a obtenção das distâncias, ângulos de orientação entre o veículo e elementos de restrição no ambiente, assim como o ângulo de abertura do bloqueio na Grade.

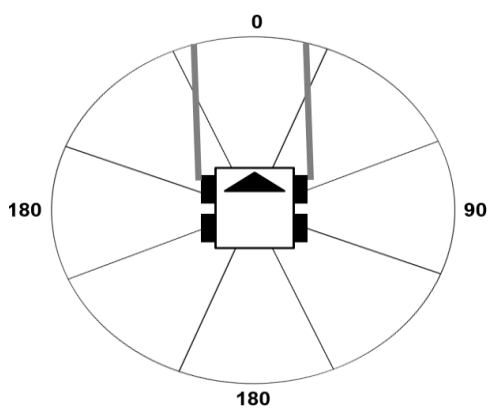


Em situações nas quais não é possível obter uma destas variáveis para um objeto de colisão, sempre é bloqueada a maior região possível como elemento de segurança. Para cada medição disponível, obtêm-se as regiões cônicas da Grade associadas aos ângulos de orientação entre veículo e elementos do ambiente: se uma medição é mais atual do que aquela já disponível na Grade, a região específica é atualizada com os valores de distância da medição, a prioridade vinculada e a data/hora atual. Se a medição possui a mesma marcação de data/hora da seção em questão, verifica-se se a medição possui maior valor de restrição (isto é, aquela com a distância mais próxima de 0.00 metro) e atualizam-se a prioridade e distância, caso a verificação seja positiva. Nos casos em que há o mesmo valor de marcação de data/hora e distância, opta-se por atualizar apenas a prioridade com o maior valor. Ao utilizar uma medição para atualizar a Grade, esta deve ser retirada do conjunto de medições, de forma que as atualizações sobre a Grade cessam após a leitura de todas as medições do conjunto de dados de restrição.

Após a aquisição dos dados, a Grade de Prioridades terá integrado dados de diversas fontes, o que permitirá gerar uma ação recomendada de movimento baseada em duas variáveis: (a) distância a ser percorrida e (b) ângulo de orientação do esterçamento. Por padrão, o movimento do veículo deve ser orientado para a região da Grade que (a) é mais próxima à região do planejamento inicial e (b) que possua o maior valor de distância livre (com valor  $d > 0.00\text{ m}$ ). Se não há nenhuma seção com distância com  $d > 0.00\text{ m}$  (o que configura o Estado de Segurança), o veículo deve permanecer parado até o próximo ciclo de tomada de decisão.

Conforme citado anteriormente, no entanto, deve-se considerar que o veículo, independentemente do seu modelo e características particulares, não consegue atravessar uma única região cônica, exceto em casos de grades de baixíssima densidade (Figura 3).

Figura 3 – Exemplo da necessidade de movimentação de um veículo em uma Grade com Regiões com abertura de 45°.



Fonte: os autores.

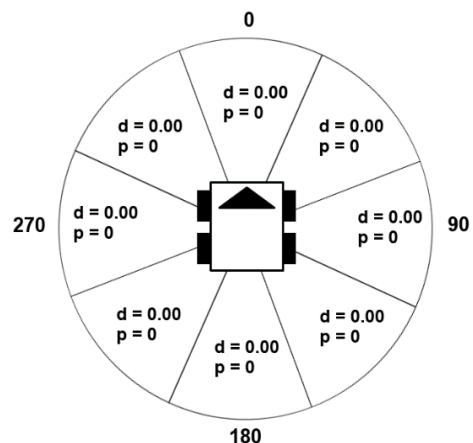
Para calcular a ação a ser realizada, inicialmente, deve-se determinar, no projeto do veículo, a quantidade mínima de regiões necessárias para a travessia do veículo (Região de Agrupamento). Após as atualizações sobre a Grade, deve-se calcular a distância máxima que pode ser percorrida para todas as possíveis Regiões de Agrupamento na Grade. Esta distância é o menor valor de distância dentre todas as regiões que compõem uma Região de Agrupamento analisada. Após calcular as distâncias máximas para todas as Regiões de Agrupamento, obtém-se a Região de Agrupamento que possui o maior valor de distância máxima. Este valor será associado ao valor da velocidade (em metros/segundo) do movimento a ser realizado pelo veículo. O esterçamento do movimento será o ângulo de orientação correspondente à diferença entre a orientação local atual do veículo (isto é, sempre a posição 0°) e o ângulo médio calculado da Região de Agrupamento selecionada.

Os valores de velocidade e esterçamento obtidos, comumente, não são repassados diretamente para movimento por parte do veículo, mas podem ser ajustados de acordo com as restrições pertinentes às características do veículo. Após o ajuste, os valores de distância e orientação são entregues aos atuadores para execução no ambiente. Ao finalizar a ação, verifica-se se o veículo atingiu a missão proposta inicialmente. Caso esta condição não seja atendida e os recursos do veículo permitam, retorna-se à Etapa 1 da construção da Grade de Prioridades.

### B.3 Exemplo de operação

Como um exemplo de utilização dos algoritmos e dos recursos da Grade de Prioridades, apresentam-se as operações realizadas. Para isto será utilizada uma grade com regiões com abertura de 45° para facilitar a visualização. A primeira etapa consiste em associar o valor de 0 para as distâncias ( $d$ ) e prioridades ( $p$ ) das regiões da Grade (a variável tempo  $t$  não será demonstrada para simplificação) (Figura 4).

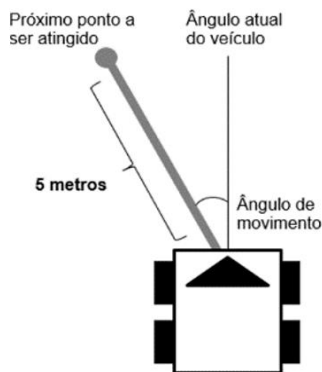
Figura 4 – Etapa 1 da construção de operações sobre a Grade de Prioridades.



Fonte: os autores.

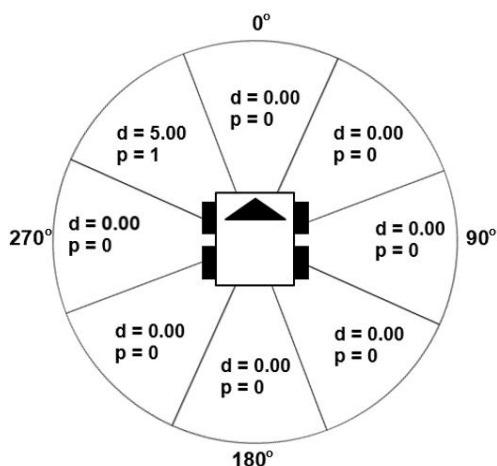
Na segunda etapa, deve-se obter a região associada ao caminho entre o veículo e o próximo ponto a ser atingido. Como exemplo consideraremos que o próximo local a ser acessado pelo veículo está a 5 metros de distância, a um ângulo de  $-10^\circ$  da frente do veículo (Figura 5 e 6).

Figura 3 – Etapa 2 da criação da Grade de Prioridades. Variáveis a serem consideradas em direção ao planejamento.



Fonte: os autores.

Figura 4 – Grade de Prioridades com os dados de planejamento.

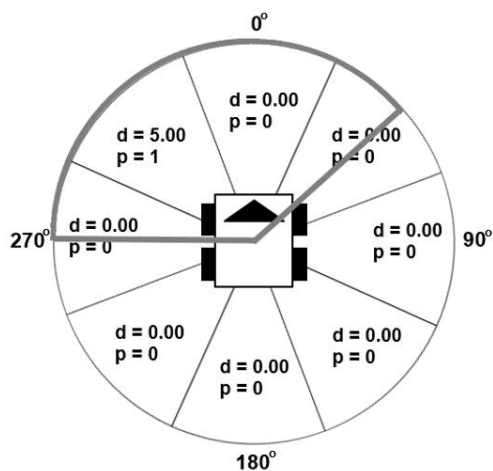


Fonte: os autores.

Na terceira etapa, constrói-se a Janela de Navegação (Figura 7). O objetivo da Janela de Navegação é determinar, baseado no planejamento anteriormente realizado, a quantidade de regiões necessárias para o veículo se locomover para aquela direção.

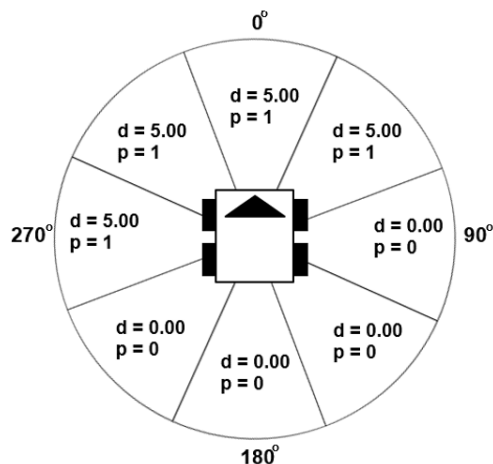
No exemplo, o veículo consegue utilizar três regiões e estas regiões também serão atualizadas com os valores de distância e prioridade iguais aos do planejamento (Figura 8).

Figura 5 – Janela de Navegação e associação dos dados relacionados à Grade.



Fonte: os autores.

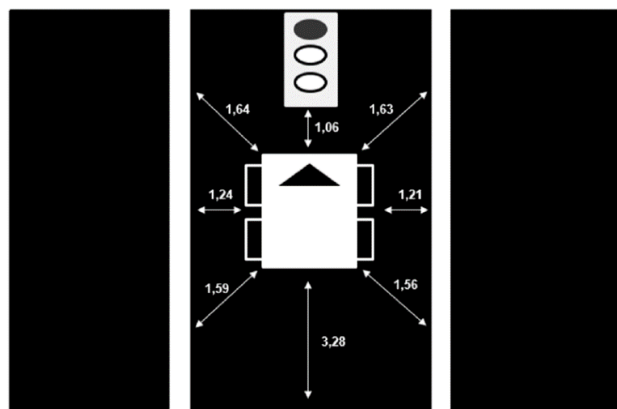
Figura 6 – Grade de Prioridades atualizada com dados da Janela de Navegação.



Fonte: os autores.

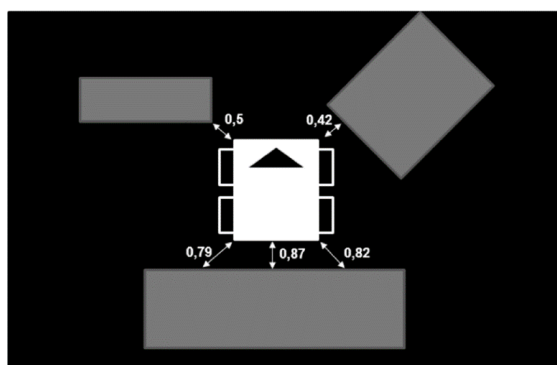
A quarta etapa envolve a aquisição de restrições no ambiente (Figuras 9 e 10).

Figura 7 – Exemplos de bloqueios do sistema de transportes.



Fonte: os autores.

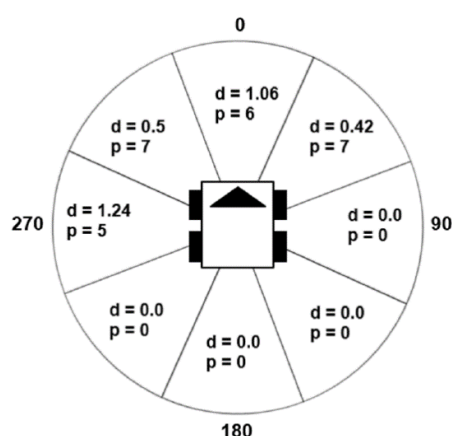
Figura 8 – Exemplos de bloqueios no ambiente.



Fonte: os autores.

As restrições da Figura 9 estão relacionadas com níveis 2 a 6, enquanto que a Figura 10 apresenta bloqueios no nível 7 da hierarquia de prioridades. Desta forma, a Grade de Prioridades pode ter suas seções atualizadas conforme a Figura 11.

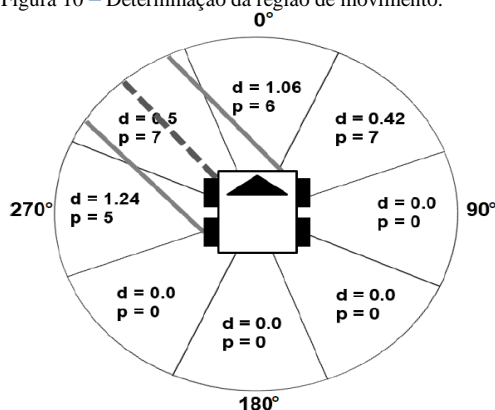
Figura 9 – Grade de Prioridades atualizada com dados de restrição.



Fonte: os autores.

A partir do estado obtido na Figura 10 é possível calcular a distância a ser percorrida e a orientação a ser realizada para esterçamento (Figura 12).

Figura 10 – Determinação da região de movimento.



Fonte: os autores.

O movimento será realizado com a velocidade de  $d$  m/s, onde  $d$  é o maior valor entre as Regiões de Agrupamento (o que equivale a 0,5 m/s na figura) para a direção obtida entre ( $0^\circ$  - Índice da Região de Agrupamento), o que na figura é igual a  $0^\circ - 45^\circ = -45^\circ$  (ou  $-0.78 \text{ rad}$ ). Após enviar estes dados para os atuadores, a Grade deve retornar para o Estado de Segurança. Verifica-se, então, se o veículo atingiu a posição final almejada. Senão, deve-se iniciar um novo ciclo de operações sobre a Grade.

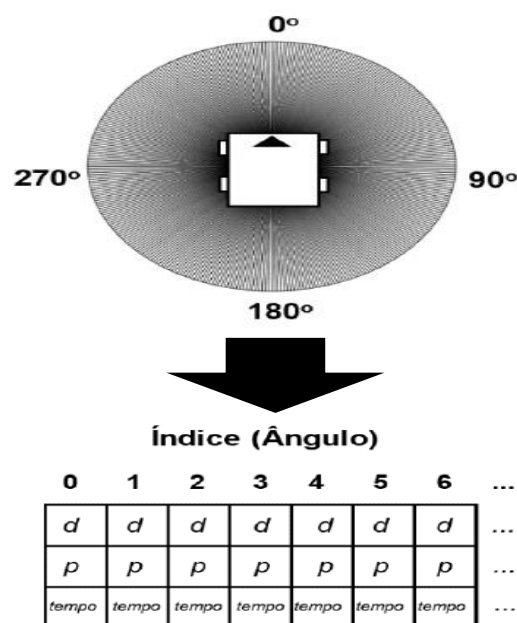
### III. MODELOS DE DESENVOLVIMENTO E DISCUSSÕES PONTUAIS

A seguir apresentam-se possibilidades de modelos de desenvolvimento computacional da Grade de Prioridades, além de discussões pontuais sobre possíveis melhoramentos que podem ser realizados para tornar o modelo mais eficiente.

#### A. Estruturas de dados para criação da Grade de Prioridades

Para utilização no sistema de navegação, a Grade de Prioridades pode ser desenvolvida computacionalmente sob diferentes formas. Um possível modelo é a combinação de três vetores com 360 posições: (a) um vetor que armazena os valores de distância, (b) um vetor que armazena os valores de prioridades e (c) um vetor que armazena os marcadores de tempo. Considera-se que o índice de uma posição no vetor representa o ângulo médio da região da Grade ao qual está associada e que, uma determinada posição de um vetor está vinculada às mesmas posições dos outros vetores (Figura 13).

Figura 11 – Adaptação de uma Grade de Prioridades de  $360^\circ$  para um vetor computacional.



Fonte: os autores.



As atualizações sobre a Grade são realizadas, nos vetores, em operações de associação e leitura das posições associadas a uma determinada região. Ao trabalhar com o conceito de Região de Agrupamento, a busca de distâncias máximas sobre distâncias conjuntas pode ser realizada por meio de uma busca simples em posições agrupadas nos vetores (Figura 14). Para otimizar a busca, se considera que, se uma Região de Agrupamento possui um valor de  $d = 0$ , não é necessário calcular a distância para esta Região específica.

Figura 12 – Busca de distância máxima em vetores baseado na Grade de Prioridades com Região de Agrupamento igual a 3.

		0	45	90	135	180	225	270	315
(a)	$d$	3.0	1	0	0	0	0	2	2.28
	$p$	1	6	1	1	1	1	4	4

		0	45	90	135	180	225	270	315
(b)	$d$	3.0	1	0	0	0	0	2	2.28
	$p$	1	6	1	1	1	1	4	4

		0	45	90	135	180	225	270	315
(c)	$d$	3.0	1	0	0	0	0	2	2.28
	$p$	1	6	1	1	1	1	4	4

Distância mínima: 2

		0	45	90	135	180	225	270	315
(d)	$d$	3.0	1	0	0	0	0	2	2.28
	$p$	1	6	1	1	1	1	4	4

Distância mínima: 1

Fonte: os autores.

#### B. Possíveis melhoramentos sobre a Grade de Prioridades

Em testes preliminares e de acordo com a natureza da Grade, algumas recomendações podem ser adotadas para possíveis implementações:

- **Adoção de técnicas específicas para ações pontuais do veículo:** a arquitetura de Grade conforme proposta neste artigo, não atende ações específicas de movimento para navegação em larga escala, tais como movimentação em diferentes níveis de elevação de terreno, ações de auto-estacionamento e outras. Desta forma, técnicas específicas de navegação devem ser adotadas para estes tipos de atividades. No entanto, muitas destas atividades podem ser modeladas sobre a Grade de Prioridades, se for necessário padronizar suas ações.
- **Utilização de sensores acurados de longo alcance com cobertura completa:** a arquitetura baseada na Grade de Prioridades é construída de forma a independe dos tipos de sensores utilizados. No entanto, a

possibilidade de colisão aumenta se não há cobertura de todas as regiões adjacentes (verticais ou horizontais) ao veículo (devido aos pontos-cegos), o que demanda sensores que, de forma combinada, cubram totalmente as regiões adjacentes ao veículo. Recomenda-se, além disto, a utilização de recursos computacionais e sensores que forneçam dados em uma frequência adequada para tomada da decisão (estabelece-se por padrão que esta frequência deve igual ou superior a 1 Hz) e que permita manter uma distância espacial conveniente para reação a eventos do ambiente.

- **Elementos do ambiente em termos de coordenadas:** ainda que a Grade de Prioridades trabalhe em termos de orientação e distância para a maior parte dos seus processos, tanto quanto possível, a arquitetura deve ser capaz de obter dados dos elementos do ambiente (em especial, sinalização de trânsito) em termos de coordenadas sobre as quais atuam, dentro do sistema de referência espacial padrão do veículo. Isto permite ao veículo compreender quais restrições deve obedecer de forma não ambígua em uma situação de trânsito, manter dados de médio e longo prazo no sistema de navegação sem perda de contexto e adquirir preliminarmente dados sobre elementos com posições conhecidas no ambiente.
- **Adoção de paralelismo de processamento:** a arquitetura baseada em Grade implementa o acesso aos sensores e a atualização das regiões associadas de forma linear. Nos testes realizados, isto pode impactar a velocidade de processamento conforme a quantidade de dados a serem trabalhados. A adoção de paralelismo ao nível de sensoriamento (isto é, com concorrência entre os subsistemas de sensoriamento) e a adoção de paralelismo ao nível da Grade (isto é, com atualização concorrente de regiões) pode aumentar a velocidade com que os processos de navegação são realizados.
- **Adoção de técnicas reativas pontuais:** a Grade de Prioridades é eficiente para tratar elementos detectados no ambiente desde que os dados sejam obtidos com antecedência adequada de acordo com o tempo de ciclo de operação da Grade de Prioridades. Para permitir tratar eventos mais rápidos ou que demandem ações mais reativas do que aquelas que podem ser obtidas pela Grade, ações reativas pontuais podem ser realizadas para solucionar eventos urgentes que se apresentem no ambiente, sem a necessidade de utilização da Grade de Prioridades.

#### IV. CONCLUSÃO

Este trabalho expôs o conceito de Grade de Prioridades como um mecanismo para integração de dados e tomada de decisão para navegação autônoma, assim como a Hierarquia de Prioridades associada. Demonstrou-se suas características e operações principais, assim como um exemplo de utilização para facilitar a visualização das operações sobre a Grade. Ao final, foram expostas recomendações para sua utilização, em especial, sob enfoque de *software*.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- [1] OZGUNER, U.; ACARMAN, T.; REDMILL, K. **Autonomous Ground Vehicles**. Norwood: Artech House, 2011.
- [2] OZGUNER, U.; STILLER, C.; REDMILL, K. Systems for Safety and Autonomous Behavior in Cars: The DARPA Grand Challenge Experience. **Proceedings of the IEEE**, v.95, n.2, p.347-412, 2007.
- [3] PISSARDINI, R.S.; WEI, D.C.; FONSECA JUNIOR, E.S. Veículos Autônomos: Definições, Conceitos e Estado-da-Arte. In: XXVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. 2013, Belém. **Anais...** Belém, 2013.
- [4] NHTSA. **Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles**. Publication NHTSA 14-13. National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC, May 2013.
- [5] BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. The Vector Field Histogram- fast obstacle avoidance for mobile robots. **IEEE J. Robotics and Automation**, v. 7, n.3, p. 278-288, 1991.
- [6] KAMON, I.; RIMON, E.; RIVLIN, E. Tangentbug: A range-sensor-based navigation algorithm. **International Journal of Robotics Research**. v. 17, n.9, p. 934-953, 1998.
- [7] CHOSET, H.; LYNCH, K.M.; HUTCHINSON, S.; KANTOR, G.; BURGARD, W.; KAVRAKI, L.E.; THRUN, S. **Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms and Implementation**. Cambridge: MIT Press, 2005.
- [8] GRASSI JUNIOR, V.; OKAMOTO JUNIOR, J. Arquitetura de controle: tipos de conceitos. In: ROMERO, R.A.F.; PRESTES, E.; OSÓRIO, F.; WOLF, D. **Robótica Móvel**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.