

RODRIGO DE SOUSA PISSARDINI

**Veículos Autônomos de Transporte Terrestre: Proposta de Arquitetura de
Tomada de Decisão para Navegação Autônoma**

**São Paulo
2014**

RODRIGO DE SOUSA PISSARDINI

**Veículos Autônomos de Transporte Terrestre: Proposta de Arquitetura de
Tomada de Decisão para Navegação Autônoma**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

**São Paulo
2014**

RODRIGO DE SOUSA PISSARDINI

Veículos Autônomos de Transporte Terrestre: Proposta de Arquitetura de Tomada de Decisão para Navegação Autônoma

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Júnior

**São Paulo
2014**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, dede 2014

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Pissardini, Rodrigo de Sousa

Veículos autônomos de transporte terrestre: proposta de arquitetura de tomada de decisão para navegação autônoma / R.S. Pissardini. – ed.rev.-- São Paulo, 2014.

180 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Robótica 2.Veículos especiais 3.Carros robóticos 4.Navegação autônoma I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

AGRADECIMENTOS

A oportunidade de realizar pesquisa científica em uma instituição acadêmica de renome internacional é uma experiência a qual devo agradecer muitas pessoas e entidades que colaboraram, direta e indiretamente, para que este trabalho fosse concluído. Aqueles que convivem comigo conhecem meu pragmatismo e, para não cometer o erro de esquecer de alguém, direciono meus agradecimentos àqueles que, comprovadamente, colaboraram para o desenvolvimento completo desta pesquisa:

- **Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior:** pela orientação e pelos ensinamentos na área de Informações Espaciais;
- **Dr. Cláudio Luiz Marte:** pela análise preliminar e sugestões com foco nas definições, conceitos de Sistemas Inteligentes de Transportes, testes a serem realizados e a inclusão do glossário;
- **Dr. Luís Eduardo Galvão Martins:** pela análise preliminar, correções e sugestões pontuais sobre arquitetura proposta e aspectos de modelagem;
- **Dr. Leopoldo Rideki Yoshioka:** pelas sugestões, em especial, aquelas relacionadas aos sistemas de controle robóticos e técnicas de navegação autônoma;
- **Dr. Luiz Augusto Koenig Veiga:** pelas críticas e sugestões sobre a arquitetura e os aspectos relacionados à Geomática;
- **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq):** pelo financiamento da pesquisa (Processo 402393/2009-0) e pelo auxílio financeiro de bolsa-mestrado (Processo 130019/2013-5).

*I met a traveller from an antique land
Who said:—Two vast and trunkless legs of stone
Stand in the desert. Near them on the sand,
Half sunk, a shatter'd visage lies, whose frown
And wrinkled lip and sneer of cold command
Tell that its sculptor well those passions read
Which yet survive, stamp'd on these lifeless things,
The hand that mock'd them and the heart that fed.
And on the pedestal these words appear:
"My name is Ozymandias, king of kings:
Look on my works, ye mighty, and despair!"
Nothing beside remains: round the decay
Of that colossal wreck, boundless and bare,
The lone and level sands stretch far away.*

Percy Bysshe Shelley, *Ozymandias of Egypt* (1818)

RESUMO

Veículos autônomos terrestres são um tipo de veículo motorizado guiado de forma autônoma por um sistema computacional, sem necessidade de intervenção humana. Esta pesquisa analisa a Tomada de Decisão autônoma necessária para este tipo de veículo, assim como os processos de navegação e as estruturas de dados que a suportam. Sobre esta análise propõe-se uma arquitetura de Tomada de Decisão para navegação autônoma baseada em dois ideias principais: a sistematização das fontes de dados com as quais o veículo deve interagir em sua navegação em uma hierarquia de prioridades de tratamento e o desenvolvimento de uma estrutura de dados chamada de Grade de Prioridades que permite definir para qual região do ambiente o veículo deve se locomover. Para suportar a arquitetura, formaliza-se um conjunto de processos recomendados de navegação robótica (percepção, posicionamento, planejamento e estratégia de movimento), organizados para suportar a integração com recursos de outras pesquisas do segmento da Robótica Móvel. Para validação da arquitetura, desenvolve-se um sistema de navegação robótica, integrada à uma plataforma robótica real, e realiza-se um conjunto de testes para simular o comportamento da arquitetura em situações de navegação específicas.

Palavras-chave: Robótica. Veículos especiais. Carros robóticos. Navegação autônoma.

ABSTRACT

Autonomous ground vehicles are a type of motor vehicle autonomously guided by a computer system without human intervention. This research analyzes the autonomous decision making required for this type of vehicle as well as the processes of navigation and data structures that support it. On this analysis, is proposed an architecture of decision making for autonomous navigation based on two fundamental ideas: the systematization of data sources with which a vehicle must interact in their navigation in a hierarchy of priorities and the development of a special data structure called Grid Priorities that defines which region of the environment the vehicle must be moved. Supporting the architecture, a set of processes for robotic navigation (perception, positioning, planning and motion strategy) are proposed and organized to support integration with other research resources in the segment of Mobile Robotics. For validate the architecture, is developed a system of robotic navigation, integrated with a real robotic platform, and is performed a set of tests to simulate the behavior of the architecture in specific situations of navigation.

Keywords: *Robotics. Special Vehicles. Robotic Cars. Autonomous Navigation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo Hierárquico de Condução	29
Figura 2: Organização física de um robô móvel	37
Figura 3: Modelo cinemático do biciclo	42
Figura 4: Exemplo de mapa de grade	45
Figura 5: Exemplo de mapa sensorial	48
Figura 6: Exemplo de mapa topológico	49
Figura 7: Representação de um mapa em uma rede de vias.....	50
Figura 8: Elipsoide de revolução com coordenadas geodésicas.....	53
Figura 9: Coordenação entre os sistemas de posicionamento local e global ..	60
Figura 10: Relação entre percurso e trajetória do veículo.....	68
Figura 11: Relação da arquitetura com os elementos do ambiente externo ...	76
Figura 12: Diagrama de componentes da arquitetura VAT-EVA.....	78
Figura 13: Grade de Prioridades com abertura de 1º	83
Figura 14: Setor circular da Grade de Prioridade e suas componentes	84
Figura 15: Etapas simplificadas da criação da Grade de Prioridades	85
Figura 16: Exemplo de Grade de Prioridades	86
Figura 17: Exemplo de distância e orientação em navegação	87
Figura 18: Grade de Prioridades com exemplo de dados de planejamento	87
Figura 19: Grade de Prioridades com dados da Janela de Navegação	88
Figura 20: Eventos do ambiente sobre a Grade de Prioridades.....	89
Figura 21: Projeção de elementos de colisão sobre a Grade de Prioridades..	90
Figura 22: Exemplo da Região de Agrupamento para travessia do veículo	91
Figura 23: Modos de operação da arquitetura VAT-EVA	112
Figura 24: Diagrama de blocos do sistema de navegação VAT-EVA	117
Figura 25: Interface gráfica de controle do sistema de navegação.	118
Figura 26: Grade de Prioridades para uma matriz computacional	118
Figura 27: Exemplo de cálculo de distância conjunta em uma Grade.....	119
Figura 28: Plataforma Robodeck e seus componentes.....	120
Figura 29: Exemplos de ações para inicialização de navegação	123
Figura 30: Configuração do ambiente para testes de inicialização	124
Figura 31: Tendência da arquitetura direcionar-se em linha reta	125
Figura 32: Comportamento esperado do veículo em relação a colisão.....	126
Figura 33: Configuração do ambiente para testes de colisão.....	126

Figura 34: Exemplos de sinalização sobre um veículo.....	128
Figura 35: Configuração do ambiente para testes de regras de trânsito.....	128
Figura 36: Configuração do ambiente de testes.....	130
Figura 37: Regiões da estrutura do veículo.....	136
Figura 38: Medições e tempo de processamento da Grade de Prioridades..	140
Figura 39: Medições e tempo de processamento do Sistema de Percepção	144
Figura 40: Grade de Prioridades no Estado de Segurança	161
Figura 41: Atualização da Grade de Prioridades baseada na rota planejada	162
Figura 42: Criação da janela de navegação baseada na rota planejada.....	162
Figura 43: Grade de Prioridades baseada em medições de restrição.....	163
Figura 44: Ação de movimento obtida da Grade de Prioridades	164
Figura 45: Diagrama do Robodeck.....	179
Figura 46: Visão geral da arquitetura do Robodeck.	180

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Percepção e reação de um condutor a um evento no trânsito	33
Quadro 2: Níveis de automatização de veículos de acordo com a NHTSA	33
Quadro 3: Parâmetros definidores do GRS80 e do WGS84	55
Quadro 4: Hierarquia de prioridade associada aos dados do VAT-EVA	80
Quadro 5: Prioridades permitidas e restritas conforme o tipo de veículo	82
Quadro 6: Vias Públicas de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro	101
Quadro 7: Características da Plataforma Robodeck	178

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Testes realizados de acordo com os tipos de navegação.	131
Tabela 2: Distância estimada entre a posição inicial e final do veículo	132
Tabela 3: Distância real entre a posição final e inicial do veículo.	133
Tabela 4: Diferença entre as distâncias estimadas e reais do veículo	133
Tabela 5: Quantidade de colisões por regiões do veículo	137
Tabela 6: Motivo de colisão e necessidade de intervenção.....	137
Tabela 7: Velocidade da geração de ação a partir da Grade de Prioridades	139
Tabela 8: Tempo médio de processamento da Grade de Prioridades.....	139
Tabela 9: Velocidade da Percepção e dos seus subprocessos.....	142
Tabela 10: Tempo médio de processamento por intervalo de medições.....	144

LISTA DE SIGLAS E ABREVIÇÕES

ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>
ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems</i>
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
ECEF	<i>Earth-Centered, Earth-Fixed</i>
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Equipe do Veículo Autônomo
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRS80	<i>Geodetic Reference System 1980</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IAU	<i>International Astronomical Union</i>
IERS	<i>International Earth Rotation Service</i>
ITRS	<i>IERS Terrestrial Reference System</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
ITS America	<i>Intelligent Transportation Systems America</i>
IVHS America	<i>Intelligent Vehicle-Highway Systems America</i>
IUGG	<i>International Union of Geodesy and Geophysics</i>
MAP	Módulo de Alta Performance
MCR	Módulo de Controle Robótico
MCS	Módulo de Controle de Sessão
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
PID	Controle Proporcional-Integral- Derivativo
PROMETHEUS	<i>PROgraMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety</i>
PTR - EPUSP	Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
SARTRE	<i>Safe Road Trains for the Environment</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>

V2V	Comunicação Inter-Veículos
VAT	Veículo Autônomo de Transporte Terrestre
VAT- EVA	Veículo Autônomo de Transporte Terrestre da Equipe do Veículo Autônomo
VisLab	<i>Artificial Vision and Intelligent Systems Laboratory</i>
WGS84	<i>World Geodetic System-84</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>
XTE	<i>Cross-track error</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO DA PESQUISA	17
1.2	METODOLOGIA DE PESQUISA	17
1.3	CONTEXTO DE PESQUISA	19
1.3.1	Veículos autônomos sob o contexto dos ITS	20
1.3.2	Veículos autônomos sob o contexto da Robótica Móvel	22
1.4	VISÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO	26
2	REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1	TOMADA DE DECISÃO PARA VEÍCULOS AUTÔNOMOS	28
2.1.1	Tomada de Decisão humana para navegação veicular	28
2.1.2	Automatização veicular e Tomada de Decisão autônoma	33
2.2	ARQUITETURA DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO TERRESTRE	36
2.2.1	Componentes físicos	36
2.2.2	Processo de navegação robótica	38
2.3	MODELOS DE ESTADOS	40
2.3.1	Modelos de Estado do Veículo	41
2.3.1.1	Modelo cinemático do biciclo	42
2.3.2	Modelos de Estado do Ambiente	43
2.3.2.1	Mapas em Grade	44
2.3.2.2	Mapas Geométricos	47
2.3.2.3	Mapas Sensoriais	47
2.3.2.4	Mapas Topológicos	48
2.3.2.4.1	<i>Mapas de vias</i>	49
2.3.3	Sistemas de referência espacial	50
2.4	PROCESSOS DE NAVEGAÇÃO	55
2.4.1	Aquisição de Missão	55
2.4.2	Percepção (Sensoriamento)	56
2.4.3	Posicionamento (Localização)	59
2.4.3.1	Posicionamento absoluto	61
2.4.3.2	Posicionamento relativo	62
2.4.4	Planejamento de rotas	64
2.4.5	Estratégia de Movimento	67
2.5	FONTES DE DADOS PARA SUPORTE À NAVEGAÇÃO	70

2.6	RESUMO DO CAPÍTULO	72
3	ARQUITETURA VAT-EVA	74
3.1	DEFINIÇÃO DE VAT	74
3.2	DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA VAT-EVA.....	75
3.2.1	Descrição do ambiente da arquitetura VAT-EVA	76
3.3	PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO DO VAT-EVA	79
3.3.1	Organização da Tomada de Decisão de navegação	79
3.3.2	Hierarquia de Níveis de Prioridades.....	79
3.3.3	Grade de Prioridades e o Processo de Tomada de Decisão.....	82
3.3.3.1	Estrutura da Grade de Prioridades	82
3.3.3.2	Uso da Grade de Prioridade para Tomada de Decisão	85
3.4	FORMALIZAÇÃO DA ARQUITETURA VAT-EVA	93
3.4.1	Padrões adotados	93
3.4.2	Conjuntos de Dados	94
3.4.2.1	Sistemas de Referência (<i>SR</i>).....	95
3.4.2.2	Modelo do Veículo (<i>MV</i>)	96
3.4.2.3	Estado do Veículo (<i>EV</i>).....	97
3.4.2.4	Modelo do Ambiente (<i>MA</i>).....	98
3.4.2.5	Modelo de navegação (<i>MN</i>)	99
3.5	COMPONENTES DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO.....	102
3.5.1	Sistema de Percepção.....	102
3.5.1.1	Percepção de Restrição	104
3.5.1.2	Percepção de Posicionamento	105
3.5.1.3	Percepção de Comunicação.....	106
3.5.2	Sistema de Planejamento.....	107
3.5.3	Sistema de Mobilidade	110
3.6	MODOS DE OPERAÇÃO DA ARQUITETURA.....	111
3.7	RESUMO DO CAPÍTULO	114
4	DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA..	116
4.1	SISTEMA DE NAVEGAÇÃO ROBÓTICA	116
4.1.1	Desenvolvimento do sistema.....	116
4.1.2	Características de desenvolvimento da Grade de Prioridades	118
4.2	APLICAÇÃO ESPECÍFICA DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO	119
4.2.1	Plataforma robótica	119
4.3	TESTES DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO.....	121

4.3.1	Metodologia de testes	121
4.3.2	Testes específicos	122
4.3.2.1	Testes de estacionamento e inicialização de rota	122
4.3.2.2	Testes de desvio de obstáculo	126
4.3.2.3	Testes de cumprimento das regras de trânsito.....	127
4.3.3	Testes de navegação global	129
4.3.3.1	Alcance e acurácia no cumprimento da missão	131
4.3.3.2	Cumprimento das regras de trânsito	135
4.3.3.3	Desvio de colisão	136
4.3.3.4	Análise do processamento da Tomada de Decisão	138
4.3.3.5	Análise do processamento de Percepção.....	142
4.4	RESUMO DO CAPÍTULO	145
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	148
	REFERÊNCIAS	153
	GLOSSÁRIO	159
	APÊNDICE A – EXEMPLO DE GRADE DE PRIORIDADES	161
	APÊNDICE B – ATRIBUTOS DOS CONJUNTOS DE DADOS	165
	APÊNDICE C – DIAGRAMAS DE ATIVIDADES DO VAT-EVA	169
	APÊNDICE D – MODOS DE OPERAÇÃO DO VAT-EVA	176
	APÊNDICE E – PLATAFORMA ROBODECK	178

1 INTRODUÇÃO

“The problem with traffic is that the people of today are driving the cars of tomorrow on the roads of yesterday.”

Bob Talbert, *Detroit Free Press* (1987)

Carros robóticos, carros sem motoristas, carros autônomos, carros cibernéticos, veículos autônomos, veículos autônomos urbanos e veículos autônomos terrestres são alguns dos termos utilizados pela literatura científica e não-científica para definir um conceito de veículo de transporte urbano capaz de navegar sobre a superfície terrestre e cuja condução seja controlada por um sistema computacional que permita prescindir da intervenção humana. Independentemente do tipo de veículo a ser utilizado (automóveis, veículos motorizados de duas ou três rodas, veículos de transporte de carga ou veículo de transporte de passageiros) o objetivo principal é integrar recursos tecnológicos gerenciados por um sistema de inteligência artificial que produzam uma navegação autônoma com maior mobilidade, segurança e confiabilidade do que poderia ser obtida pela condução humana (OZGUNER; STILLER; REDMILL, 2007; OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011; PISSARDINI; WEI; FONSECA JUNIOR, 2013).

Por definição, o principal processo a ser realizado por um veículo autônomo terrestre é a Tomada de Decisão: este processo envolve escolher, dentre um conjunto de opções de ação disponíveis, aquela mais adequada para ser realizada no ambiente conforme o processamento realizado pelo veículo. Historicamente, diversos modelos de Tomada de Decisão autônoma têm sido desenvolvidos e esta pesquisa avalia tais modelos, assim como os processos de navegação robótica e estruturas de dados que lhes dão suporte. O objetivo desta pesquisa é, assim, determinar quais modelos de Tomada de Decisão são mais apropriados para utilização em veículos que devem interagir com os sistemas de transportes.

Esta pesquisa é realizada no âmbito da Equipe do Veículo Autônomo (EVA) do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PTR - EPUSP). A EVA tem desenvolvido, desde 2011, um conjunto de pesquisas multidisciplinares para desenvolvimento de

tecnologias de navegação autônoma utilizando recursos da Geomática e dos Sistemas Inteligentes de Transportes (em inglês *Intelligent Transportation Systems* – ITS). Entre as pesquisas preliminarmente realizadas podem ser citados os trabalhos de Gonçalves (2011), Reina (2012) e Mori (2013).

1.1 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo principal desta pesquisa é desenvolver um modelo de arquitetura padronizado, integrado e funcional de Tomada de Decisão para veículos autônomos terrestres, formalizando-se a organização das estruturas de dados e algoritmos associados que compõem o modelo.

O desenvolvimento do modelo de arquitetura de Tomada de Decisão possui como foco principal permitir a integração de diversos recursos das áreas de ITS e da Robótica Móvel, provendo uma estrutura centralizada e neutra sobre a qual outras tecnologias podem operar com reduzido esforço de adaptação. A Tomada de Decisão nesta pesquisa é adotada em alto nível, i.e., seu escopo abrange interpretar e reagir a eventos comuns do sistema de trânsito sem ter uma preocupação preliminar sobre quais tecnologias deverão ser utilizadas em um contexto específico (baixo nível).

1.2 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para atender ao objetivo proposto, a pesquisa foi realizada através das seguintes etapas:

- **Revisão bibliográfica:** a revisão teve como objetivo determinar quais são os modelos computacionais mais adequados para construção de um modelo de arquitetura conceitual e lógica de Tomada de Decisão em um veículo autônomo terrestre. A análise, inicialmente, considerou (a) como é realizada a Tomada de Decisão para navegação veicular humana (com restrição para modelos cognitivos de Tomada de decisão em navegação veicular) e (b) quais os principais elementos

dos sistemas de transportes (legislação, sinalizações, eventos e atores) devem ser considerados por um condutor para realizar uma navegação veicular. A partir desta análise, considerou-se as principais propostas da literatura científica para a Tomada de Decisão em navegação veicular robótica (restringindo-se para os tipos de arquiteturas de Tomada de Decisão, processos de navegação e estruturas de dados vinculadas) e quais destas propostas são adequadas para realizar a navegação de forma similar ou superior àquela que pode ser realizada por um condutor médio.

- **Formalização conceitual e lógica de arquitetura de Tomada de Decisão para veículos autônomos terrestres:** como proposta neste trabalho: (a) organizam-se os tipos de dados que um veículo deve sensoriar e processar em níveis de prioridades hierarquizados e (b) define-se uma estrutura de dados chamada de Grade de Prioridades que serve como componente central da Tomada de Decisão realizada. Associado a estes dois elementos, está um conjunto de algoritmos e sistemas que permitem sua operação e compõem a arquitetura completa de Tomada de Decisão. A arquitetura é construída de forma neutra (i.e., independentemente das tecnologias específicas que podem ser utilizadas), com o intuito de permitir a integração de outras tecnologias e arquiteturas com reduzido esforço de alteração. A formalização é dada por um conjunto de algoritmos e fluxogramas criado através da notação UML (*Unified Modeling Language*) versão 2.4.1, sendo utilizado o *software* Microsoft Visio 2013 para geração dos diagramas.
- **Implementação da arquitetura em um sistema de navegação específico:** o modelo de arquitetura proposto foi construído sob a forma de um sistema de navegação em *software*, posteriormente integrado à uma plataforma robótica para validação da arquitetura. Um conjunto de testes de navegação foi realizado para estabelecer a acurácia do processamento, possibilidades de melhoria e a origem de possíveis erros na arquitetura e na aplicação de navegação.

1.3 CONTEXTO DE PESQUISA

Historicamente, as pesquisas em veículos autônomos terrestres têm apresentado diversas motivações para a sua realização: a principal delas considera que, ao reduzir a participação do condutor humano e automatizar os eventos de navegação veicular, permite-se a redução dos acidentes de trânsito, a otimização da mobilidade urbana e o aumento da produtividade média da população (BENENSON, 2008; PISSARDINI; WEI; FONSECA JUNIOR, 2013).

Recursos e tecnologias para automatizar processos específicos da condução veicular já estão disponíveis ao grande público, sendo chamados genericamente de *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS - Sistemas Avançados de Apoio ao Motorista). Entre tais sistemas incluem-se o *anti-lock braking system* (ABS - sistema de frenagem que evita que a roda trave e entre em derrapagem), *cruise control system* (sistema que controla automaticamente a velocidade do veículo de acordo com uma velocidade previamente programada), sistemas de visão noturna, sistemas de reconhecimento de sinalização, sistemas de estacionamento automático baseados em sensores, sistemas anti-colisão, sistemas de comunicação inter-veículos e sistemas de posicionamento (OZGUNER; STILLER; REDMILL, 2007; OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011). Os ADAS estão normalmente integrados na estrutura do veículo que, em última instância, ainda é controlado por um condutor humano (mesmo que haja a possibilidade do veículo navegar de forma autônoma em situações específicas - por exemplo, em sistemas de estacionamento automático). Veículos que contam com recursos de ADAS mas que ainda necessitem do controle de um condutor humano são conhecidos como veículos inteligentes. A proposta dos veículos autônomos terrestres é manter e integrar os diversos recursos de ADAS, mas submetê-los a um sistema de controle computacional que substitua o condutor humano e realize todas as decisões necessárias para a navegação.

As pesquisas em veículos autônomos terrestres e veículos inteligentes têm sido segmentadas, historicamente, em duas abordagens distintas: aquelas oriundas dos ITS e aquelas oriundas da Robótica Móvel. Os diferentes grupos de pesquisa, montadoras de veículos e empresas de desenvolvimento em veículos autônomos terrestres têm se distribuído entre estas duas visões, adotando um

viés de acordo com a sua área de pesquisa, o que tem levado ao surgimento de técnicas e ferramentas heterogêneas para serem utilizadas na condução autônoma. Abordagens multidisciplinares, no entanto, também tem sido consideradas como um meio de padronizar e tornar viável a existência de veículos autônomos terrestres para uso em larga escala.

1.3.1 Veículos autônomos sob o contexto dos ITS

As pesquisas baseadas em ITS possuem como foco a adoção de tecnologias, dados e padrões que permitam tornar o sistema de transportes mais seguro (evitando os acidentes de trânsito), otimizado (reduzindo os tempos de viagem dos atores do sistema de transportes) e globalmente inteligente (ao integrar as ações dos seus componentes – veículos, infraestrutura de transportes e outros) (GHOSH; LEE, 2010; PISSARDINI; WEI; FONSECA JUNIOR, 2013).

A primeira proposta de veículo autônomo terrestre no contexto dos ITS foi apresentada em 1939 na Feira Mundial de Nova Iorque com a exposição Futurama, patrocinada pela empresa General Motors Corporation. Esta exposição apresentava uma visão futurista do sistema de trânsito com rodovias automatizadas para navegação de veículos controlados remotamente. A proposta não teve continuidade e os esforços dos fabricantes de automóveis na década de 1940 foram direcionadas para a produção militar na Segunda Guerra Mundial (LIFE, 1939; GEDDES, 1940; WETMORE, 2003; OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

Com o término da Segunda Guerra Mundial, diversas tecnologias desenvolvidas para fins militares (como o radar) foram adaptadas para automatizar e aumentar os recursos de navegação em automóveis. Na década de 1950, a General Motors e a Radio Corporation of America iniciaram, conjuntamente, o desenvolvimento de um conjunto de tecnologias para automação de condução veicular: o primeiro produto, apresentado em 1953, era um modelo em escala de um sistema rodoviário automatizado para testes. No mesmo ano, foi iniciada a produção de uma série de carros-conceito chamados Firebird, desenvolvidos para demonstração de funcionamento de novas tecnologias. Para a navegação

autônoma, o principal modelo de importância é o Firebird II apresentado como um veículo com sistema de condução automática guiado por um fio enterrado na via que enviava sinais de rádio. A primeira demonstração de condução automatizada ocorreria em 1958: o veículo possuía em sua parte frontal bobinas magnéticas que captava a corrente alternada de um cabo elétrico enterrado no solo (WETMORE, 2003).

Em 1964, foi realizada uma nova Feira Mundial em Nova Iorque na qual apresentou-se uma nova visão do futuro dos sistemas de transportes. Nesta visão, torres de controle gerenciariam a direção, freios e velocidade de cada veículo em pistas automáticas; e grupos de veículos poderiam interagir entre si permitindo a locomoção em intervalos iguais (WETMORE, 2003).

Até a década de 1980, não ocorreram alterações significativas para a automação da condução veicular no contexto dos ITS. Em 1986, um relatório, produzido por um grupo de engenheiros para a *Federal Highway Administration* dos Estados Unidos da América (EUA), no qual exploravam os benefícios da adoção de um sistema automatizado de vias, permitiu a formação de uma iniciativa nacional para tornar os sistemas de transportes mais inteligentes utilizando recursos tecnológicos. Esta iniciativa levou ao surgimento da organização *Intelligent Vehicle-Highway Systems America* (IVHS America), cujo nome foi modificado, em 1991, para *Intelligent Transportation Systems America* (ITS America): trata-se de uma associação sem fins lucrativos que inclui diversas instituições acadêmicas, governamentais e da iniciativa privada, sendo fundamental para o desenvolvimento e consolidação das principais pesquisas na área de ITS (GAGE, 1995; WETMORE, 2003).

Entre os anos de 2009-2012, a Comissão Europeia financiou o projeto *Safe Road Trains for the Environment* (SARTRE) desenvolvido por um consórcio de empresas com o objetivo de tornar o transporte na Europa mais inteligente e eficaz. Uma dos principais desenvolvimentos do projeto foi o conceito de “autoestradas de trem”: trata-se de um modelo de comboio lógico, onde um conjunto de veículos é conectado via rede de comunicação sem fio a um veículo condutor controlado por um motorista profissional. Esta tecnologia não exige modificação nas vias de navegação, pois seu principal objetivo é utilizar sensores e tecnologias já embarcados nos veículos disponíveis no mercado, sendo tais

recursos expandidos através da comunicação inter-veículos. A proposta considera que as autoestradas podem ser utilizadas em vias de alta velocidade (tais como rodovias), enquanto vias urbanas de baixa velocidade podem utilizar métodos de navegação autônomas básicas (DÁVILA; NOMBELA, 2010; ROBINSON; CHAN; COELINGH, 2010)¹.

Atualmente, as pesquisas em ITS têm sido diversificadas para automação dos diversos elementos do sistema de transportes e não apenas dos veículos. Entre estes elementos incluem-se os veículos propriamente ditos, a sinalização de trânsito, a infraestrutura de transportes e outros componentes: o principal objetivo dos sistemas ITS tem sido integrar estes diversos componentes do sistema de transporte e oferecer a capacidade de interação e comunicação em diversas camadas operacionais (GHOSH; LEE, 2010).

1.3.2 Veículos autônomos sob o contexto da Robótica Móvel

A aplicação da abordagem robótica para pesquisas em veículos autônomos terrestres teve início na década de 1960, oriunda das pesquisas em Robótica Móvel, campo da robótica com o intuito de criar dispositivos automáticos com capacidade de movimento para fins militares e de exploração em ambiente terrestre, aéreo, marítimo e espacial. Posteriormente, estas pesquisas foram ampliadas para atender outros objetivos: atualmente robôs móveis são utilizados para atividades industriais, tarefas domésticas, veículos de transportes, desarmamento de explosivos, cirurgias, socorro emergencial em ambientes de difícil acesso e outros usos (GAGE, 1995; CHOSET *et al.*, 2005; SECCHI, 2008).

Os primeiros esforços para prover autonomia para robôs capazes de movimento sobre superfície terrestre ocorreram entre os anos de 1966 - 1972 com as pesquisas relacionadas ao robô Shakey desenvolvido pelo Centro de Inteligência Artificial do Instituto de Pesquisa de Stanford sob financiamento da *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) nos EUA. Shakey é considerado o primeiro robô móvel operado por técnicas de inteligência artificial: tratava-se

¹ O conjunto de publicações relacionadas ao projeto pode ser obtido em <http://sartre-project.eu>

de uma plataforma robótica sobre rodas, equipada com uma câmera de TV, um telêmetro, sensores ultrassônicos e sensores de toque, comunicando-se por radiofrequência com um computador *mainframe*. Na época, Shakey foi considerado um fracasso por não conseguir atingir a plena autonomia, mas estabeleceu princípios que serviram para o desenvolvimento das pesquisas futuras em navegação autônoma (NILSSON, 1969; 1984; GAGE, 1995; DUDEK; JENKIN, 2010).

Em 1977 o Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade de Tsukuba, no Japão construiu o que é considerado, pela literatura científica, como o primeiro veículo robótico inteligente. Tratava-se de um carro dotado de um sistema de visão computacional baseada em câmeras de televisão e uma unidade de processamento. O veículo podia detectar obstáculos e seguir linhas brancas no solo (TSUGAWA, 1994; BENENSON, 2008).

Na década de 1980, o engenheiro aeroespacial alemão Ernst Dickmanns (considerado “o pioneiro do carro autônomo”) e sua equipe da Universidade Federal das Forças Armadas de Munique, na Alemanha, desenvolveram uma série de projetos na área da condução autônoma. Destes projetos destaca-se o veículo VaMoRs de 1985, uma *van* Mercedes-Benz, equipada com câmeras e outros sensores, onde a direção e outros componentes eram controlados por dispositivos computacionais. O veículo podia, de forma autônoma, atingir até 100 km/h em vias sem tráfego (BROGGI *et al.*, 1999; OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011).

Em 1987, as empresas japonesas Fujitsu e Nissan desenvolveram o *Personal Vehicle System*, um sistema baseado em um micro-ônibus que utilizava um conjunto de câmeras, processadores de imagens e sistemas de controle que permitiam detectar marcações na pista e realizar detecção de obstáculos (TSUGAWA, 1994).

Entre os anos de 1987-1995, grupos de pesquisas na Europa uniram esforços para o desenvolvimento de projetos com objetivo de tornar mais eficiente o tráfego urbano no continente europeu, o que ficou conhecido como programa Eureka PROMETHEUS (sigla de *PROgraMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety*) (OZGUNER; ACARMAN; REDMILL, 2011). No âmbito do Eureka, Dickmanns apresentou em 1994 um veículo

Mercedes-Benz Classe-S modificado chamado de VaMP, que dirigiu de forma autônoma por mais de 1000 quilômetros, com velocidades de até 130 km/h. Em 1995, o veículo VaMoRs-P, foi capaz de atingir velocidade de navegação de até 160 km/h na Autoban alemã executando uma série de manobras que permitia ultrapassar outros veículos (DICKMANNNS *et al.*, 1994; BROGGI *et al.*, 1999).

Outra pesquisa participante do projeto EUREKA foi o projeto italiano *Artificial Vision and Intelligent Systems Laboratory* (VisLab) do Departamento de Tecnologia da Informação da Universidade de Parma que, em cooperação com a Universidade de Turim, desenvolveu um protótipo chamado de MobLab, que servia como plataforma padrão de pesquisa para todos os grupos de pesquisa italianos envolvidos com o projeto EUREKA. Com o encerramento do projeto, o VisLab segmentou-se em outros projetos entre os quais destaca-se o ARGO desenvolvido entre 1997-2001 pela Universidade de Parma. ARGO era um protótipo de veículo que seguia marcas pintadas em uma estrada não-modificada, utilizando duas câmeras de vídeo preto-e-branco de baixo custo e algoritmos de visão estereoscópica. O projeto permitiu a navegação de dois mil quilômetros por seis dias com velocidade média de 90 km/h sendo que o controle autônomo foi realizado em 94% do tempo (BROGGI *et al.*, 1999).

Na década de 1980, a DARPA iniciou as pesquisas com o *Autonomous Land Vehicle*, utilizando técnicas oriundas do desenvolvimento do robô Shakey. O veículo integrava radar, visão computacional e mecanismo de controle robótico. As primeiras demonstrações em 1985 atingiam velocidade máxima de 3 km/h em navegação autônoma, progredindo para 10 km/h em 1986 e 21 km/h em 1987 (GAGE, 1995).

Desde 1984, o Laboratório de Navegação da Universidade Carnegie Mellon vem construindo diversos protótipos para navegação autônoma chamados de NavLab. Em 1995, o veículo semiautônomo NavLab 5 (no qual apenas a direção possuía controle autônomo) foi utilizado no evento *No Hands Across America*, navegando por quase 5000 km, entre as cidades de Pittsburgh e San Diego, andando de forma autônoma por 98,2 % do tempo (POMERLEAU, 1995; BROGGI *et al.*, 1999).

Nos anos de 1990, o Governo dos EUA financiou três projetos conhecidos como Demo I e III (pelo exército dos EUA) e Demo II (pela DARPA) que permitiram a

pesquisa para navegação autônoma de veículos terrestres não-tripulados em terreno de difícil navegação, permitindo o desvio de obstáculos (GAGE, 1995; OZGUNER; STILLER; REDMILL, 2007).

Em Julho de 2002, a DARPA lançou o evento *Grand Challenge*, uma competição para estimular a pesquisa em navegação para veículos terrestres não-tripulados, com a intenção de tornar autônoma parte da frota dos veículos militares estadunidenses (OZGUNER; STILLER; REDMILL, 2007; URMSON *et al.*, 2009). A primeira competição foi realizada em 2004, com o prêmio de um milhão de dólares e tinha como objetivo navegar 228 km sem intervenção humana em, no máximo, 10 horas. O cenário de navegação, com intuito de simular ambientes de combate, abrangia grandes variações do terreno, alta quantidade de sujeira, curvas sinuosas e pequena fração de estradas pavimentadas. A competição teve 107 equipes inscritas, sendo que 15 efetivamente correram, mas nenhum dos veículos participantes conseguiu navegar de forma autônoma por mais do que 5% de todo o percurso (THRUN *et al.*, 2006; URMSON *et al.*, 2009).

O desafio foi repetido em 2005, quando 23 equipes participaram da competição: destas, 5 equipes conseguiram finalizar a corrida e o robô da Universidade de Stanford chamado Stanley foi considerado o campeão. Stanley foi produzido por uma equipe de pesquisadores de Stanford, da Intel Research, da Volkswagen e de outras entidades. Tratava-se de uma plataforma com seis processadores, sensores e atuadores para navegação autônoma. O *software* do veículo não era centralizado, sendo os módulos executados de forma paralela e sem sincronismo. No entanto, cada dado possuía uma marca temporal para quando havia sido obtido, permitindo a integração temporal entre os dados de sistema (THRUN *et al.*, 2006; OZGUNER; STILLER; REDMILL, 2007; URMSON *et al.*, 2009).

Em 2007 foi realizada a terceira versão da competição da DARPA, sob o nome de *Urban Challenge*, tendo um ambiente urbano simulado como cenário operacional. Os veículos participantes receberam missões diferenciadas, de modo a provocar situações nas quais os veículos, executando objetivos e ações divergentes, deveriam obedecer a leis de trânsito e interagir entre si para garantir a coexistência. O evento final contou com 11 veículos, sendo vencedor o veículo Boss da Universidade Carnegie Mellon (URMSON *et al.*, 2009).

Os resultados obtidos nas competições da DARPA serviram como parâmetros para os desenvolvimentos posteriores na área de veículos autônomos terrestres. O desenvolvimento mais proeminente neste sentido é aquele realizado pela empresa estadunidense Google Incorporation que, desde 2010, tem desenvolvido uma série de carros conhecidos como Google Car. Os veículos integram um conjunto de sensores (incluindo radares, câmeras e receptores *Global Positioning System* - GPS) e técnicas de posicionamento baseadas em um sistema de mapas detalhados do terreno. O componente central do veículo é um telêmetro a *laser* instalado sobre o teto do veículo e que gera um modelo tridimensional do ambiente. Inicialmente, o veículo é guiado por condutores humanos pelo ambiente para coleta de dados. Posteriormente, quando o veículo navega de forma autônoma, os dados obtidos do ambiente são comparados com os dados previamente coletados, permitindo assim diferenciar objetos fixos de objetos dinâmicos. Os esforços da empresa levaram às primeiras adoções de legislação específica para utilização de carros robóticos nos estados de Nevada, da Flórida e da Califórnia, todos nos EUA (GUIZZO, 2011; MULLER, 2012; PINTO, 2012).

1.4 VISÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é estruturada em seis capítulos organizados de acordo com os materiais e métodos propostos neste capítulo em 1.2: neste primeiro capítulo realizou-se uma introdução ao tema da pesquisa descrevendo-se o contexto de pesquisa, os objetivos a serem alcançados e os métodos utilizados para resolução do problema proposto.

No capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica proposta para o trabalho, analisando-se o processo de Tomada de Decisão em navegação veicular humana e robótica.

O capítulo 3 apresenta a proposta de arquitetura do Veículo Autônomo de Transporte Terrestre da Equipe do Veículo Autônomo (VAT-EVA).

O capítulo 4 descreve o desenvolvimento de um sistema de navegação para veículos autônomos terrestres baseado na arquitetura proposta no capítulo 3.

Descrevem-se, também, os testes associados, dos quais se obtém uma análise estatística descritiva e realiza-se uma discussão sobre os resultados obtidos.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre a pesquisa realizada, descrevendo-se os conhecimentos obtidos, as dificuldades e desvantagens antes, durante e após a pesquisa, as possibilidades de trabalhos futuros decorrentes deste projeto e as conclusões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

“[First Law] A robot may not injure a human being, or, through inaction, allow a human being to come to harm. [Second Law] A robot must obey the orders given it by human beings except where such orders would conflict with the First Law. [Third Law] A robot must protect its own existence as long as such protection does not conflict with the First or Second Laws.”

Isaac Asimov, *Runaround* (1942)

Este capítulo apresenta os fundamentos da Tomada de Decisão a serem considerados para os veículos autônomos terrestres. A primeira seção descreve como é realizada a Tomada de Decisão humana para navegação veicular. A segunda seção apresenta os principais modelos computacionais utilizados pela Robótica Móvel para imitar a Tomada de Decisão humana, assim como os processos e estruturas de dados que lhes oferecem suporte.

2.1 TOMADA DE DECISÃO PARA VEÍCULOS AUTÔNOMOS TERRESTRES

2.1.1 Tomada de Decisão humana para navegação veicular

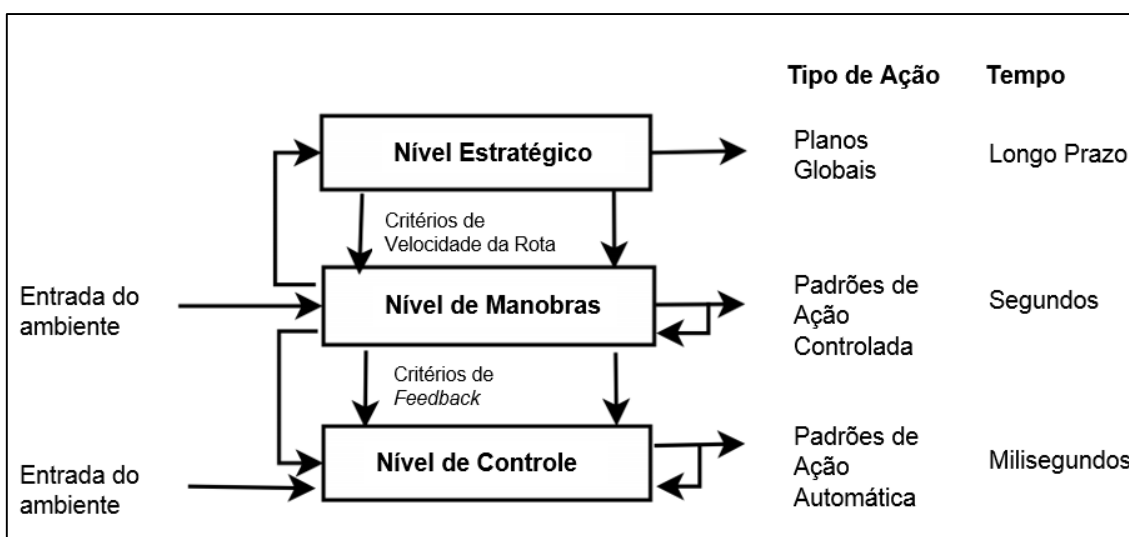
Navegação veicular terrestre (de agora em diante chamada neste trabalho apenas de navegação), ou condução veicular terrestre, pode ser definida como a utilização de um veículo terrestre motorizado de qualquer tipo (automóveis, veículos motorizados de duas ou três rodas, veículos de transporte de carga ou veículo de transporte de passageiros²) por parte de um ser humano (chamado condutor ou motorista) para sair de um determinado local e atingir outro do seu interesse (missão). Para realizar esta navegação, o condutor deve monitorar os eventos do ambiente, interagir com os diversos sistemas que compõem o veículo utilizado e produzir ações de movimento que permitam não apenas atingir a missão proposta, mas também manter a integridade do condutor e do veículo.

O modo como o condutor realiza as operações de navegação tem sido, historicamente, analisado sob duas abordagens: (a) abordagem comportamental

² A segmentação dos veículos motorizados neste formato é realizada pelo Código de Trânsito Brasileiro (CTB) (BRASIL, 1997).

– analisa as ações realizadas pelo condutor em resposta aos eventos do ambiente, mas não há análise dos processos mentais envolvidos na ação; e (b) abordagem cognitiva - avalia os processos mentais utilizados pelo condutor para interagir com o ambiente de navegação e realizar a Tomada de Decisão. Lutzenberger e Albayrak (2013) apresentam uma descrição dos principais modelos propostos para cada abordagem, porém, essencialmente, todos os modelos modernos originam-se de um modelo simplificado proposto por Michon (1985) e chamado de Modelo Hierárquico de Condução (Figura 1) (MICHON, 1985; LUTZENBERGER; ALBAYRAK, 2013).

Figura 1: Modelo Hierárquico de Condução



Fonte: Lutzenberger e Albayrak (2013) adaptado de Michon (1985)

Neste modelo, as ações do condutor de um veículo são classificadas em três níveis, sendo que o condutor transita entre um nível e outro conforme o contexto da navegação (MICHON, 1985; LUTZENBERGER; ALBAYRAK, 2013):

- **Nível estratégico:** estabelece a posição final a ser alcançada e as estratégias (planejamento) de como atingir esta região. O nível estratégico agrupa, assim, planejamento e ações de longo prazo.
- **Nível de manobras:** a partir do planejamento estratégico, o condutor determina as manobras (ações combinadas) disponíveis e necessárias para atingir seu objetivo global.

- **Nível de controle:** refere-se às ações fundamentais e responsivas executadas pelo condutor conforme um determinado contexto de navegação, tais como a ajustar a velocidade de controle, manter o veículo na estrada, seguir em linha reta, etc.

As ações nos níveis de manobras e controle variam conforme os dados de entrada obtidos do ambiente. Estes dados de entrada englobam os diversos eventos que ocorrem no ambiente que podem interferir na condução veicular. Fastenmeier e Gstalter (2011) chamam de situação de trânsito (ou situação de tráfego) às contínuas combinações de eventos com os quais o condutor deve interagir para realizar a navegação veicular. Os principais eventos que podem compor uma situação de trânsito são:

- Sinalizações e regras de trânsito;
- Comportamento de outros veículos,
- Elementos naturais (pessoas, animais, clima, vegetação, etc.);
- Elementos artificiais (tais como construções prediais, monumentos e etc.);
- Comportamento do próprio veículo e
- Comportamento do condutor.

A interação do condutor com estes eventos é dinâmica e pode ser definida nas seguintes etapas: (a) avaliar o comportamento dos elementos do ambiente, (b) reconhecer possíveis restrições e riscos presentes na situação, (c) prever as ações disponíveis a serem realizadas, (d) escolher a ação mais conveniente em direção ao objetivo global proposto e (e) aplicar a ação escolhida fisicamente sobre os sistemas que compõem o veículo executando a manobra desejada. Estas ações são efetuadas ciclicamente pelo condutor até atingir a missão global proposta (WICKENS; HOLLANDS, 2000).

A avaliação do condutor sobre a situação de trânsito é realizada através da extração de características dos elementos do ambiente através dos sentidos humanos. Por padrão, o condutor obtém informações sensoriais simplificadas do ambiente e modela-as em representações mentais, a partir das quais busca associações com modelos mentais de sua memória de longo prazo. Modelos mentais são representações genéricas aprendidas pelo condutor sobre características específicas do ambiente e sobre os comportamentos que devem

ser adotados. O desenvolvimento de modelos mentais e a associação com o que é adquirido do ambiente é produto do aprendizado e da experiência prática do condutor (CUNY; CHAUVIN, 2009).

Idealmente, o condutor deveria ser capaz de sempre escolher a melhor ação possível em relação a uma determinada situação de trânsito em termos de segurança (tanto para os ocupantes do veículo, para o próprio veículo e para o ambiente de navegação), de velocidade (i.e., realizada de forma precisa, no momento correto) e com menor custo de recursos do veículo. No entanto, os diversos eventos do ambiente raramente são tratados de forma eficiente já que sofrem interferência de fatores diversos que impactam sobre a capacidade do condutor adquirir informação do ambiente, realizar a Tomada de Decisão ou executar uma determinada ação. Estes fatores são conhecidos na literatura científica e não-científica como fatores adversos ou condições adversas de trânsito.

Os principais fatores adversos de trânsito são:

- **Fatores adversos do condutor:** este grupo de fatores abrangem eventos e comportamentos físicos e mentais, intencionais ou não, do próprio condutor do veículo que possam interferir no processo de navegação.
- **Fatores adversos de iluminação:** as condições adversas são provocadas pela alteração da iluminação disponível para o condutor reconhecer o ambiente (exemplo, navegação noturna, ofuscamentos, reflexos, etc.).
- **Fatores adversos do clima:** condições adversas de clima são aquelas provocadas por fatores climáticos (chuva, aquaplanagem, vento, frio, calor, neblina, etc.) que podem interferir na capacidade do condutor controlar o veículo e na eficiência dos componentes veiculares realizarem suas ações.
- **Fatores adversos da via:** condições adversas de vias são provocadas por eventos como ausência de vias de transportes adequadas para navegação veicular (por exemplo, estradas de terra), vias mal construídas, falta de manutenção, ausência ou deficiência na sinalização, vias em obras e outros fatores que podem interferir na capacidade do

condutor conduzir o veículo e na eficiência dos componentes veiculares realizarem suas ações.

- **Fatores adversos do veículo:** eventos provocados pela incapacidade do veículo realizar suas ações de forma adequada. Entre os fatores que interferem nas ações produzidas incluem-se componentes quebrados, desalinhados ou deficientes.
- **Fatores adversos da carga:** condições adversas provocadas pelos efeitos da carga transportada pelo veículo. Entre os efeitos adversos produzidos pela carga incluem-se o excesso de peso, a perecibilidade da carga e o desequilíbrio da carga em relação ao veículo.
- **Fatores adversos do trânsito:** situações pertencentes ao trânsito que restringem as opções de ação do condutor. Exemplos incluem congestionamentos, interação com outros veículos no ambiente, entre outros.
- **Fatores adversos dos passageiros:** passageiro é o indivíduo que é transportado pelo veículo, mas que não o conduz. Fatores adversos podem incluir comportamentos imprevistos por parte dos passageiros, excesso de pessoas, entre outros.

Além das condições adversas, deve-se considerar que parte das situações de trânsito exigem limites restritos de tempo para Tomada de Decisão e sua execução de forma segura, o que pode exigir que o condutor reaja a determinadas situações do ambiente de forma instintiva e que possua capacidade física e mental conveniente para tomar a decisão e realizá-la em qualquer restrição de tempo que se apresente. Autores como Green (2000), Muttart (2001), Olson e Farber (2003) conduziram estudos sobre os tempos de reação para navegação mas não existe, ainda, uma definição formal do tempo de um padrão de velocidade com a qual o condutor deva realizar suas ações, pois esta velocidade é dependente de diversos fatores humanos, sistêmicos e ambientais. Green (2000) descreve valores médios de tempo de reação de um condutor comum e atento a um evento no trânsito (Quadro 1). Estes valores, no entanto, não consideram ações sem necessidade de reação responsiva, já que tais ações não demandam uma resposta em um limite de tempo estrito.

Quadro 1: Tempo de percepção e reação média de um condutor a um evento no trânsito

Tipo de Evento	Características	Tempo (em segundos)
Esperado	Condutor com plena atenção e com o pé no acelerador	0,70 s e 0,75 s (0,5 s de percepção e 0,2 s de reação).
Inesperado	Resposta dos condutores para eventos não previstos mas comuns na condução veicular (e.g., parar em relação ao veículo da frente, reagir a um sinal de trânsito)	1,25 s (1,05 s de percepção e 0,2s de reação).
Surpreendente	Resposta para circunstâncias incomuns no trânsito (e.g., pedestres atravessando a rua fora da faixa de pedestres em distância próxima)	1,5 s (sendo 1,2 s de percepção e 0,3 s de reação).

Fonte: O Autor, baseado em Green (2000)

2.1.2 Automatização veicular e Tomada de Decisão autônoma

A adoção de tecnologias para automatização de processos de navegação veicular possui dois objetivos principais: (a) reduzir a influência das condições adversas de trânsito sobre a navegação (permitindo ao condutor interagir adequadamente com o ambiente sem considerar possíveis variações de comportamento) e (b) reduzir a necessidade de intervenção do condutor humano em processos específicos (permitindo ao condutor tratar apenas aos eventos mais prioritários do ambiente).

A automatização da navegação veicular pode ser adotada em diferentes níveis e processos. O Quadro 2 apresenta os níveis de automatização que um veículo terrestre urbano pode obter, de acordo com a *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) dos EUA (NHTSA, 2013).

Quadro 2: Níveis de automatização de veículos de acordo com a NHTSA

Nível de automatização	Descrição
Nível 0 (Sem automatização)	Motorista controla completamente a direção, frenagem e aceleração do veículo.

Nível 1 (Automatização de funções específicas)	Uma ou mais funções de controle do veículo são automatizadas.
Nível 2 (Automatização de funções combinadas)	Pelo menos duas ou mais funções de controle são automatizadas e funcionam em conjunto. Motorista pode assumir controle sem aviso prévio.
Nível 3 (Automatização para navegação autônoma limitada)	O veículo pode assumir o controle de navegação em situações específicas e o motorista possui tempo de transição antes de necessitar assumir o controle.
Nível 4 (Automatização para navegação autônoma completa)	Veículo pode navegar de forma autônoma com segurança, sem necessidade preliminar de que o condutor assuma o controle do veículo.

Fonte: NHTSA, 2013

Veículos inteligentes (i.e., veículos cujo objetivo é automatizar processos da navegação, mas não necessariamente tomar todas as decisões) atendem aos níveis 1 a 3 do modelo da NHTSA. O nível 4 somente pode ser atendido por veículos autônomos terrestres cujo objetivo principal é substituir a Tomada de Decisão humana por uma Tomada de Decisão automatizada que gere ações com maior confiabilidade e segurança.

Historicamente, diversas técnicas têm sido desenvolvidas com o intuito de cumprir a automatização do controle veicular de forma plena e substituir a Tomada de Decisão humana. As primeiras propostas de navegação autônoma, surgidas na primeira metade do século 20, baseavam-se em duas ideias principais: (a) a adoção de vias automatizadas que, em combinação com centrais de controle, conduziram os veículos em pistas segmentadas (exemplos incluem os protótipos exibidos nas Feiras Mundiais de Nova Iorque de 1939 e 1964) e (b) a adoção de circuitos enterrados cujo campo magnético poderia ser detectado pelos veículos (WETMORE, 2003). Estas ideias possuíam como pressuposto criar vias estruturadas similares àquelas utilizadas por sistemas de transportes em ambiente controlado (como trens): no entanto, são de elevado custo e de difícil aplicação, pois toda a malha viária necessitaria ser adaptada para atender a automóveis e outros tipos de veículos que seguissem a este conceito.

Com o surgimento da Robótica Móvel na década de 1960, pesquisas na área de Inteligência Artificial permitiram desenvolver modelos para Tomada de Decisão em navegação veicular autônoma de forma embarcada. Independentemente do tipo de aplicação desenvolvida, os tipos de Tomada de Decisão são classificados em três modelos principais (SECCHI, 2008; WOLF *et al.*, 2009; RUSSELL; NORVIG, 2010; BERRY, 2012):

- **Sistemas deliberativos (planejados):** neste tipo de sistema, o veículo possui uma representação preliminar do ambiente que é utilizada para tomar as decisões de navegação. Desta forma, o veículo não considera as possíveis variações que podem ocorrer no ambiente, o que torna os sistemas deliberativos recomendados apenas para cenários de navegação controlados nos quais possa-se conhecer as posições dos outros elementos do ambiente e não ocorram eventos imprevistos. O modelo deliberativo é utilizado, por exemplo, no primeiro robô móvel inteligente Shakey (NILSSON, 1969; 1984), porém não é adequado para veículos autônomos terrestres na maior parte dos seus cenários de navegação, pois não permite tratar as variações apresentadas em ambientes dinâmicos (como as vias de transporte) e não tratam diretamente os efeitos das condições adversas de navegação.
- **Sistemas reativos (reflexivos):** neste tipo de sistema, as instruções de ação são geradas em resposta aos dados convenientes extraídos do ambiente (obtidos de sensores) sem a realização de um planejamento prévio de longo prazo, ou seja, o planejamento é realizado de acordo com os eventos atuais conforme ocorrem. É um tipo de sistema que gera ações altamente responsivas com baixo custo de processamento computacional em comparação com aquelas realizadas pelos sistemas deliberativos ou híbridos. Sistemas reativos, no entanto, são dependentes dos dados de sensoriamento (já que suas ações dependem do que é medido) o que pode impactar sua performance em ambientes com grande quantidade de elementos ou com ruídos de medição. Outro problema das arquiteturas reativas é que a geração de múltiplas ações reativas simples pode gerar um comportamento emergente imprevisível capaz de interferir na performance da navegação do veículo.

- **Sistemas híbridos:** modelo de sistema mais próximo ao comportamento do condutor humano, por integrar planejamento inicial de longo prazo e reação pontual a eventos do ambiente. Processos que não demandam planejamento prévio (como desvio imediato de colisão) são tratados de forma reativa, enquanto processos mais complexos (como planejamento de ação a médio e longo prazo) são tratados de forma deliberativa. Sistemas híbridos podem, também, executar ações reativas ou deliberativas de forma concorrente.

Na seção a seguir, analisam-se os componentes recomendados à navegação robótica para veículos autônomos terrestres e em como devem ser organizados para gerar um sistema de Tomada de Decisão adequado para simular o comportamento de um condutor.

2.2 ARQUITETURA GENÉRICA DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO TERRESTRE

2.2.1 Componentes físicos

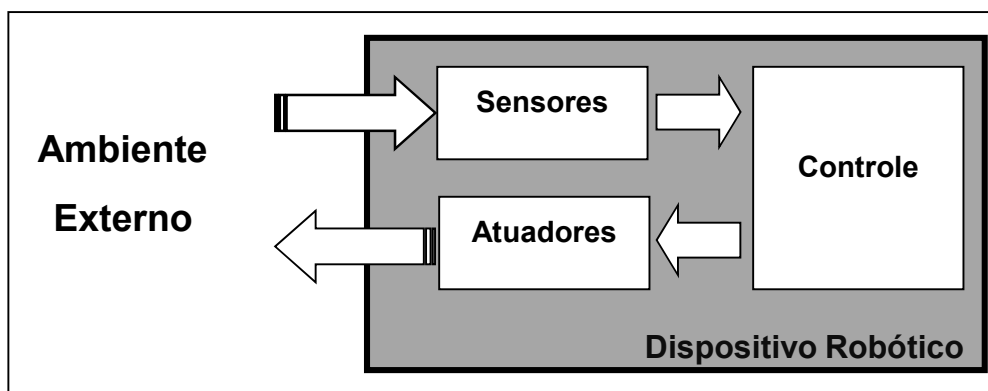
Modernamente, qualquer veículo autônomo terrestre moderno é desenvolvido como um robô móvel, já que se pressupõe que o veículo deve possuir em sua própria estrutura recursos para obter dados do ambiente, tomar decisões e interagir com o ambiente de forma autônoma. Um robô móvel pode ser definido como uma máquina controlada por um sistema programável que, interagindo com um determinado ambiente, converte instruções eletrônicas em ações físicas que permitem a locomoção da sua própria estrutura sem necessidade de recursos externos (XIE, 2003; SIEGWART; NOURBAKHSH, SCARAMUZZA, 2011). Um veículo autônomo terrestre é, assim, um robô móvel resultante da integração entre uma estrutura veicular (qualquer veículo de transporte que possua uma estrutura mecânica passível de automatização) e um sistema computacional robótico capaz de controlar³ a condução do veículo parcialmente (veículo semi-robótico) ou permanentemente (veículo robótico). A integração

³ Em termos de tempo de navegação e de componentes do veículo.

pode ser original ao projeto de um determinado veículo ou ser resultado de um veículo pré-existente a um sistema computacional robótico.

Como um robô móvel, um veículo autônomo terrestre pode ser fisicamente organizado em uma estrutura com três tipos de componentes integrados: sensores, atuadores e dispositivo-controlador (Figura 2) (RUSSELL; NORVIG, 2010; BERRY, 2012).

Figura 2: Organização física de um robô móvel



Fonte: O Autor.

Sensores são os diversos componentes mecânicos e eletrônicos que captam impressões físicas (químicas, elétricas, magnéticas, térmicas, radiantes) do ambiente (sensores exteroceptivos) ou da própria estrutura do veículo (sensor propioceptivos). Estes componentes são estruturados em sistemas próprios ou sistemas compartilhados com outros sensores para converter as impressões obtidas (transdução) em dados digitais adequados, sobre os quais são aplicados algoritmos apropriados (filtros, amplificadores, etc.) para representação do ambiente e manipulação pelo dispositivo de controle (BORENSTEIN; EVERETT; FENG, 1996; XIE, 2003; SIEGWART; NOURBAKHSH, SCARAMUZZA, 2011; SECCHI, 2008).

O dispositivo de controle é um dispositivo computacional programável capaz de receber dados de entrada e organizá-los em um fluxo de processamento, sobre o qual são aplicados algoritmos adequados para produzir resultados que solucionem um determinado problema. O modo como os algoritmos e dados são trabalhados é que estabelece se a Tomada de Decisão será realizada de forma deliberativa, reativa ou híbrida, definindo assim o tipo de autonomia de controle

do veículo. Os resultados gerados pelo dispositivo de controle são dados, em geral, na forma de instruções de ação de movimento.

As instruções de ação geradas pelo dispositivo de controle são, então, enviadas aos atuadores. Atuadores são o conjunto de componentes mecânicos e eletrônicos capazes de converter instruções lógicas em ações específicas no mundo real (XIE, 2003; BERRY, 2012). No caso dos veículos autônomos terrestres, as ações de movimento propostas pelo dispositivo de controle devem ser passíveis de serem repassadas aos sistemas que compõem a estrutura veicular (em especial, o sistema de condução e o sistema de transmissão) que devem interagir de forma sincronizada para atuar sobre o ambiente.

2.2.2 Processo de navegação robótica

Seres humanos realizam a atividade de navegação veicular combinando um conjunto de procedimentos mentais e físicos, baseados na observação e na capacidade mental de modelar o ambiente. Ainda que diversos modelos tenham sido propostos para determinar como o ser humano representa mentalmente os elementos necessários para a Tomada de Decisão, não há um modelo ainda satisfatório na literatura que permita compreender como o ser humano toma suas decisões.

No caso da Robótica Móvel, um modelo abstrato considera que os elementos envolvidos na navegação robótica podem ser tratados sob a forma de estados (também chamados de configurações). Um estado é uma representação discreta do comportamento de variáveis específicas do robô móvel ou dos elementos do ambiente em um determinado intervalo de tempo. O objetivo desta representação é estabelecer o conjunto de estados que um elemento da navegação pode assumir no espaço e no tempo, assim como as transições (mudanças) que permitem que o elemento migre de um estado para outro. Em um robô móvel, as ações realizadas pelo robô são produzidas por contínuos ciclos de processamento onde se obtém o estado desejado que o robô deve alcançar (missão ou estado final) e o estado atual que o robô está (posição atual) (RUSSELL; NORVIG, 2010).

Para veículos autônomos terrestres, um estado pode ser descrito em função da região do espaço que um determinado elemento ocupa no ambiente de navegação. Desta forma, define-se o processo de navegação veicular como o processo de um veículo, a partir do seu estado atual (região atual que ocupa no ambiente), mover sua estrutura de modo a atingir um estado final desejado (região final). Para organizar este processo de navegação, torna-se necessária a combinação de um conjunto de outros processos, que variam de acordo com o tipo de aplicação desenvolvida (DURRANT-WHYTE, 2001; CHOSSET *et al.*, 2005; WOLF *et al.*, 2009). Sob uma forma geral, no entanto, o processo de navegação pode ser segmentado nos seguintes subprocessos principais:

- **Aquisição da missão (estado a ser atingido):** missão designa o estado final (posição no espaço) que o veículo deve atingir através do seu movimento. É o evento inicial do processo de navegação: a missão pode ser proposta por um agente humano, pela intervenção de outro sistema ou ser provocada pela reação do robô móvel a um determinado evento ou comportamento do ambiente.
- **Percepção ou Sensoriamento (estado atual do ambiente):** conjunto de componentes e sistemas vinculados aos sensores, tendo como objetivo extrair dados do ambiente (tanto do ambiente externo como do próprio veículo), filtrá-los e modelá-los em representações de estado necessárias para outros subprocessos de navegação.
- **Posicionamento ou Localização (estado atual do veículo):** define a capacidade do veículo obter os dados do seu estado atual em relação ao ambiente no qual está navegando.
- **Planejamento de rota (estados intermediários a serem atingidos):** conjunto de dados e algoritmos que permitem estimar preliminarmente os estados e ações intermediários adequados e de menor custo operacional que o veículo deve realizar no ambiente para evitar a colisão e, a partir destes estados definidos *a priori*, planejar as ações ideais de locomoção.
- **Mapeamento (estados do ambiente armazenados no veículo):** especialização da Percepção, este subprocesso armazena os dados obtidos pela percepção em um formato interno apropriado que possa ser utilizado em navegações futuras, em especial, pelo processo de

planejamento de rota. Enquanto a Percepção, por padrão, possui como objetivo principal estimar o estado atual do ambiente, descartando os dados obtidos após sua utilização por parte do processo de navegação, o Mapeamento tem o objetivo de armazenar este estado para uso futuro. Trata-se de um processo opcional: em outros casos de necessidade, o mapeamento pode ser substituído pela aquisição *a priori* de um conjunto de dados sobre o ambiente, sem necessidade de realização do processo de Mapeamento.

- **Estratégia de movimento (transição entre estados):** subprocesso que tem como objetivo gerar as ações que devem ser realizadas para movimentar o veículo. Enquanto o Planejamento de Rota estima o estado a ser assumido pelo robô móvel e as ações associadas a serem realizadas, a Estratégia de Movimento gera as ações efetivas a serem aplicadas para locomoção, que são repassadas a um sistema capaz de traduzi-las para que os atuadores executem as ações observáveis no mundo real.

Estes processos são organizados em um ciclo de processamento contínuo que sensoria o ambiente, interpreta os dados obtidos, gera instruções de ação sobre estes dados e executa a ação no ambiente. O ciclo de processamento, no caso de desenvolvimento de um veículo autônomo, deve ser realizado em um limite de tempo aceitável para interagir adequadamente com o ambiente como faria um condutor humano.

2.3 MODELOS DE ESTADOS

A modelagem de estados é uma atividade necessária para definir como um robô móvel irá realizar seu processamento, como serão desenvolvidos os processos de navegação e como a Tomada de Decisão será realizada. O modelo de estados a ser escolhido é dependente dos tipos de dados a serem manipulados e dos algoritmos que serão aplicados.

Para um robô móvel como o veículo autônomo terrestre, dois tipos de modelo de estados podem ser considerados: (a) um Modelo de Estados do Veículo: que

define o comportamento do veículo no espaço e no tempo para atender aos processos de Aquisição de Missão, Posicionamento, Planejamento de Rotas e Estratégia de Movimento; e (b) um Modelo de Estados do Ambiente: que define o comportamento dos elementos do ambiente no espaço e no tempo para os processos de Percepção, Mapeamento, Planejamento de Rotas e Estratégia de Movimento.

2.3.1 Modelos de Estado do Veículo

A escolha de um Modelo de Estado do Veículo é dependente do nível de abstração com a qual se busca descrever o veículo. Cada tipo de veículo (robótico ou não) possui uma arquitetura específica que atende a uma tecnologia, conceito e proposta de acordo com seu desenvolvedor ou fabricante. A arquitetura de um veículo de qualquer tipo combina um conjunto de sistemas que interagem com ações do condutor para produzir movimentação e cujo desenvolvimento é objeto de estudo das áreas das engenharias mecânica, automobilística, elétrica e outras. No entanto, para os processos de navegação, o veículo pode ser representado de forma mais simplificada como um corpo rígido no espaço modelado em função de suas variáveis que expressam seu estado no espaço-tempo, sem necessidade de detalhar características mais específicas do veículo. Esta modelagem pode ser realizada de duas formas (SIEGWART; NOURBAKHSH, SCARAMUZZA, 2011; SECCHI, 2008):

- **Modelagem cinemática:** modelagem mais genérica, trata o veículo como uma massa pontual, sem considerar forças de perturbação que possam interferir em sua estrutura e ações.
- **Modelagem dinâmica:** considera as forças de perturbação que possam interferir na navegação do veículo. É um tipo de modelagem própria para aplicações mais específicas nas quais busca-se compreender as variáveis do ambiente que impactarão sobre o veículo.

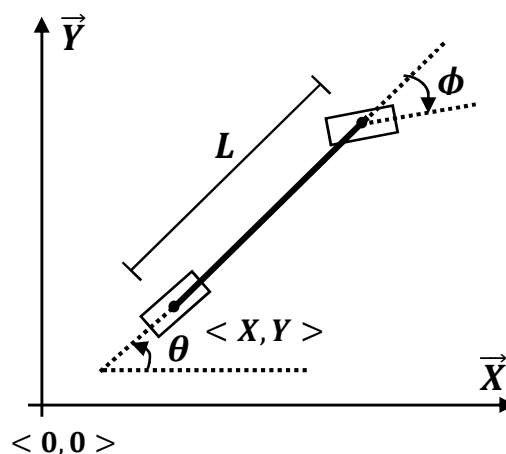
Para o desenvolvimento da arquitetura de Tomada de Decisão neste trabalho, a estrutura do veículo é considerada em alto nível, de forma neutra (pois busca atender a qualquer tipo de veículo em qualquer cenário de operação) e não se

consideram forças de perturbação específicas. Opta-se, assim, por um modelo cinemático chamado modelo do biciclo (ou bicicleta), um modelo com cinemática simples, no espaço bidimensional, plenamente adequado para definir as operações de Tomada de Decisão em um nível genérico e com possibilidade de posterior ajustamento para outros modelos cinemáticos e dinâmicos mais detalhados de acordo com o tipo de veículo a ser utilizado. Modelos cinemáticos e dinâmicos utilizados em robótica móvel podem ser consultados em Dudek e Jenkin (2010) e Berry (2012), enquanto modelos aplicados a automóveis e outros veículos de transportes podem ser consultados em Brown e Edwards (2010).

2.3.1.1 Modelo cinemático do biciclo

O modelo do biciclo é um modelo cinemático que representa o estado do veículo por um vetor na forma das variáveis X, Y, θ, ϕ (Figura 3) (BENENSON, 2008; BROWN, EDWARDS, 2010; DUDEK; JENKIN, 2010).

Figura 3: Modelo cinemático do biciclo



Fonte: Benenson (2008).

As variáveis $[X, Y]$ representam as coordenadas do veículo em um sistema de referência espacial convencional e estão associadas ao eixo traseiro do veículo. A variável $[\theta]$ é o ângulo de orientação do veículo em relação ao sistema de coordenadas do ambiente e $[\phi]$ é o ângulo de esterçamento associado ao

eixo das rodas frontais. A variável L representa a distância entre o eixo dianteiro e traseiro do veículo.

O estado do veículo pode, então, ser representado conforme a Equação 2.1. sob a forma:

$$(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{\theta}, \dot{\phi}) = f((X, Y, \theta, \phi), (u_1, u_2)) \quad (2.1)$$

Na qual (X, Y, θ, ϕ) é o estado atual do veículo, sobre o qual é aplicada a velocidade de movimento u_1 (para o eixo traseiro) e a velocidade de esterçamento u_2 (para o eixo dianteiro). O resultado é um novo estado do veículo sob a forma $(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{\theta}, \dot{\phi})$. A Equação 2.2 apresenta a relação entre os vetores:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ \frac{1}{L}\tan\phi \\ 0 \end{bmatrix} \times u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times u_2 \quad (2.2)$$

2.3.2 Modelos de Estado do Ambiente

Ambiente define todo o espaço de navegação que um veículo possa ocupar, incluindo a própria região do espaço que ocupa no momento presente. O veículo autônomo terrestre deve ter a capacidade de extrair dados do ambiente para interagir adequadamente com os eventos conforme se apresentam e modelá-los em um estado apropriado que represente a situação de trânsito na qual está envolvido (CHOSSET *et al.*, 2005; DUDEK; JENKIN, 2010).

A construção de um modelo de estado do ambiente é realizada, inicialmente, pela integração de dados oriundos de múltiplas fontes (sensores, informações *a priori*, comunicação, etc.) em representações utilizadas para que o robô móvel realize seus diversos processos de navegação. Estas representações são chamadas de mapas computacionais. Mapas computacionais podem ser divididos em dois grupos básicos (FILLIAT; MEYER, 2003; THRUN, 2002; WOLF *et al.*, 2009; DUDEK; JENKIN, 2010):

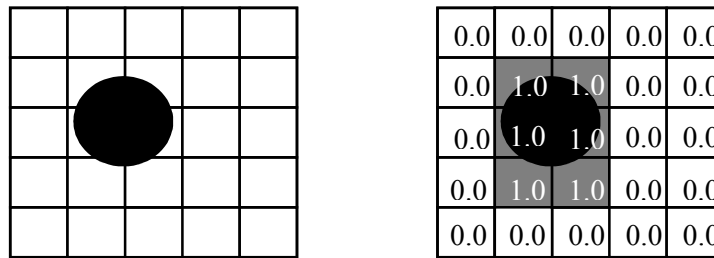
- **Mapas métricos:** tipo de mapa que descreve o ambiente e seus elementos através de suas propriedades físicas. Os dados armazenados são modelados através de formas geométricas adequadas para realização das atividades de navegação.
- **Mapas topológicos:** tipo de mapa que representa o ambiente através das relações (de adjacência, ordenação, etc.) de elementos generalizados de um ambiente, produzindo comumente estruturas de dados na forma de grafos.

Por definição, mapas métricos são mais detalhados e precisos do que mapas topológicos, mas podem exigir maior custo computacional de armazenamento e processamento para descrever um ambiente de forma precisa. Mapas topológicos exigem menor custo computacional de armazenamento e processamento, mas podem não são adequados para tratar o ambiente quando há necessidade de alto detalhamento. De forma a minimizar as desvantagens entre os dois tipos de mapas, modelos híbridos são também propostos (BUSCHKA; SAFFIOTI, 2004).

Mapas métricos e mapas topológicos podem ser segmentados em quatro grupos de mapas mais básicos: mapas em grade, mapas geométricos, mapas sensoriais e mapas topológicos. Em parte da literatura, mapas em grade e mapas geométricos são organizados em um grupo único chamado de mapas de segmentação de espaço (ou de decomposição de espaço).

2.3.2.1 Mapas em Grade

Mapa em grade (também chamado de espaço livre, grade de ocupação, grade de certeza, grade de inferência, mapa de probabilidade e outros termos, conforme o tipo de desenvolvimento) é um modelo de mapa computacional métrico que divide o ambiente em uma matriz bidimensional de células de tamanho homogêneo. Cada célula armazena um valor convencionalizado que define se está ocupada por algum elemento ou se ela está livre para ocupação (Figura 4) (THRUN, 1998; FILLIAT; MEYER, 2003).

Figura 4: Exemplo de mapa de grade

Fonte: O Autor.

A determinação se uma região está ou não ocupada pode ser realizada de três formas, de acordo com a origem dos dados utilizados para composição da grade:

- **Baseada em dados *a priori*:** o mapa em grade é construído preliminarmente à navegação utilizando dados de fontes diversas (como bases de dados geográficas e dados de mapeamento) de forma que o veículo já sabe, antes de sua locomoção, as regiões do espaço que são livres para navegação. Esta abordagem possui boa performance para ambientes de escala reduzida e de natureza estática, mas pode ser de difícil aplicação para descrição de grandes ambientes (como uma cidade) ou de ambientes dinâmicos.
- **Baseada em dados dos sensores:** o veículo utiliza seus sensores para obter as posições dos diversos elementos no ambiente, associando cada posição a uma célula da grade. Desta forma, as células sem elementos são consideradas como livres, enquanto células associadas a algum elemento são consideradas como ocupadas. Exemplos de combinação entre dados de sensores e modelos de grade são técnicas como *Virtual Force Fields* e *Vector Field Histogram*, que utilizam dados de sonar para determinar quais células do ambiente estão ocupadas ou não (BORENSTEIN; KOREN, 1991). A principal vantagem da adoção de mapas em grades para dados de sensores é a não necessidade de extração de características dos elementos do ambiente para sua construção (FILLIAT; MEYER, 2003). A desvantagem desta abordagem está no fato de que a grade é comumente construída baseada nos limites de alcance dos sensores do robô móvel, inviabilizando planejamento a

médio e longo prazo já que o veículo não consegue reconhecer se as células fora do seu sensoriamento estão ocupadas ou não.

- **Híbrida:** nesta abordagem, cria-se uma grade preliminar à navegação, que fornece uma estimativa do que o robô móvel encontrará no ambiente. A estimativa sobre cada célula é confirmada ou não, de acordo com os dados obtidos dos sensores. Esta abordagem minimiza as desvantagens associadas àquela baseada exclusivamente em sensores, mas ainda mantém os mesmos problemas da abordagem baseada em dados preliminares.

O mapa de grade, independente da abordagem, deve lidar com dois problemas principais: o primeiro deles consiste em estabelecer um mecanismo de fusão de dados para determinar o valor que deve ser associado a uma célula caso haja múltiplos dados para uma mesma região do espaço. Este problema pode ter tratamento complexo quando se considera que dois ou mais dados para uma mesma célula podem não possuir o mesmo valor de ocupação, quer por erro de medição, quer por utilizarem diferentes técnicas de medição ou, ainda, pelos tipos de dados utilizados para definir o valor de ocupação. O segundo problema envolve definir quais os valores para regiões de espaço com valores de ocupação desconhecidos (provocados por ausência de dados, dados incompletos ou dados contaminados por ruído).

Para atender a estes problemas, pesquisadores em Robótica Móvel têm adotado, desde o trabalho de Moravec e Elfes (1985), a utilização de técnicas probabilísticas em combinação com os mapas em grade. A principal técnica probabilística utilizando mapas de grade considera os valores associados à cada célula como a probabilidade dela estar ocupada ou não. A grade é iniciada com todas as células com um valor de probabilidade desconhecido (por exemplo: 50% de probabilidade da célula estar ocupada), sendo cada célula atualizada com a probabilidade *a posteriori* de ocupação, baseada nos dados dos sensores (FILLIAT; MEYER, 2003; CHOSSET *et al.*, 2005; SECCHI, 2008; WOLF *et al.*, 2009). O cálculo de probabilidades, de acordo com as técnicas historicamente desenvolvidas, pode ser segmentado em cinco paradigmas: probabilístico (MORAVEC; ELFES, 1985), bayesiano (MATTHIES; ELFES, 1988), redes neurais (THRUN, 1993), bayesiano ampliado (KONOLIGE, 1997) e sensores de

avanço (THRUN, 2001). Uma descrição adequada de cada técnica pode ser encontrada em Collins, Collins e Ryan (2007).

2.3.2.2 Mapas Geométricos

Mapas em grade eficazes quanto ao detalhamento e mapeamento do ambiente de navegação podem exigir alto custo de armazenamento e processamento computacional para atender à necessidade de cobrir uma área extensa com velocidade adequada a cada ciclo de navegação. Outra limitação dos mapas em grade é que, por suas características bidimensionais, o mapa em grade planifica os elementos do ambiente, de modo que inviabiliza descrições tridimensionais.

Mapas geométricos são mapas métricos que buscam solucionar estas limitações, utilizando formas geométricas bidimensionais ou tridimensionais (pontos, linhas, malhas triangulares, *splines*, poliedros, etc.) para segmentar o ambiente (CHOSET *et al.*, 2005 DUDEK; JENKIN, 2010).

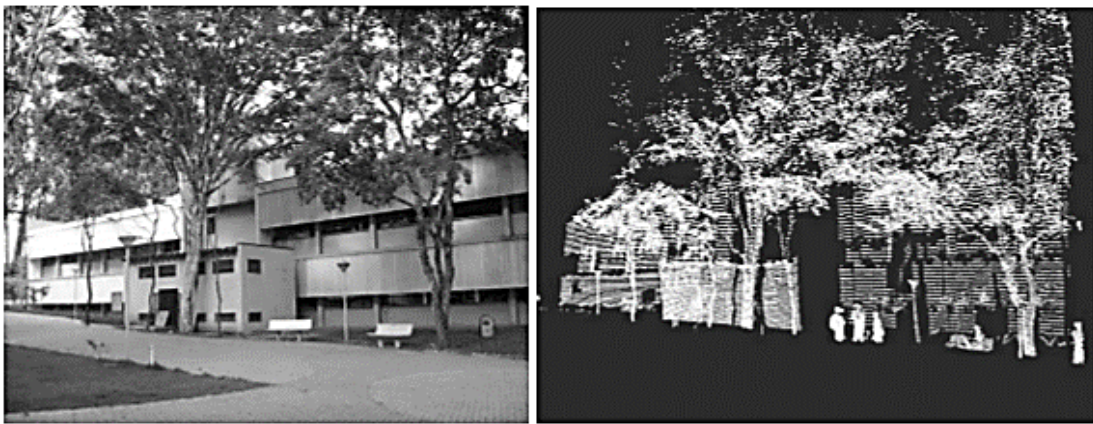
Exemplos de mapas geométricos incluem modelos digitais de terreno, grafos de visibilidade e decomposições do espaço (quando existe um padrão que possa ser aplicado). Como os mapas geométricos são computacionalmente tratados através de parâmetros numéricos, facilitam-se as operações de transformação e manipulação geométrica, além de reduzir o custo de processamento e armazenamento de dados. A escolha do tipo de forma geométrica será realizada de acordo com a necessidade da operação a ser realizada sobre o espaço a ser mapeado. Choset *et al.* (2005) apresenta uma descrição de diferentes formatos de implementação de modelos geométricos e os contextos nos quais devem ser aplicados.

2.3.2.3 Mapas Sensoriais

Mapa sensorial é um tipo de mapa métrico que obtém dados brutos (nuvens de pontos) de sensores (como aqueles baseados em *laser*) criando uma representação tridimensional do ambiente, onde cada partícula obtida dos

sensores é associada a uma posição em um sistema de coordenada espacial padrão, usualmente em coordenadas cartesianas (Figura 5) (WOLF *et al.*,2009; DUDEK; JENKIN,2010). Pela quantidade de dados que captura, mapas sensoriais oferecem alto detalhamento sobre o ambiente que descrevem, porém há a exigência de sensores com custo de aquisição mais elevado e capacidade de processamento de alto desempenho para manipular todos os pontos obtidos em um tempo confiável para realização das operações necessárias.

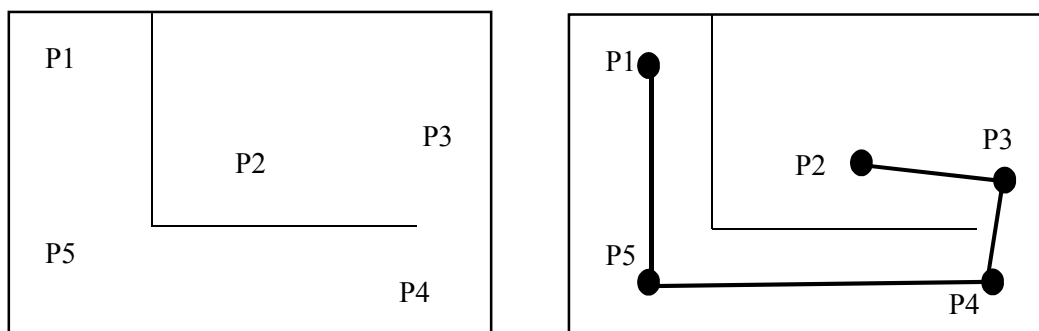
Figura 5: Exemplo de mapa sensorial



Fonte: Wolf *et al.* (2009)

2.3.2.4 Mapas Topológicos

Mapas topológicos (ou mapas relacionais) são mapas computacionais que descrevem a relação geométrica entre elementos específicos do ambiente que são escolhidos de acordo com a necessidade de desenvolvimento (regiões de interesse, situações, marcadores de terreno) dos quais são extraídas características convenientes (Figura 6). As relações entre os elementos são modeladas na forma genérica de um grafo, no qual os vértices armazenam os elementos de interesse e as arestas as relações entre os nós, em geral, relações de adjacência. As operações de inserção, remoção e busca sobre o mapa gerado podem ser, então, trabalhadas de acordo com a Teoria dos Grafos (FILLIAT; MEYER, 2003; THRUN, 1998; 2002).

Figura 6: Exemplo de mapa topológico

Fonte: O Autor.

Mapas topológicos são eficientes para modelar eventos que não demandam alto grau de detalhamento (por exemplo, trajetórias) em sua construção, além de possuir menor custo de processamento e armazenamento computacional em comparação com mapas métricos. Ainda que mapas topológicos possuam menor detalhamento do que mapas métricos, mapas topológicos podem ser enriquecidos com informações métricas como determinar se uma aresta é unidirecional ou não, o custo de transição por uma aresta, etc. (FILLIAT; MEYER, 2003; CHOSET *et al.*, 2005).

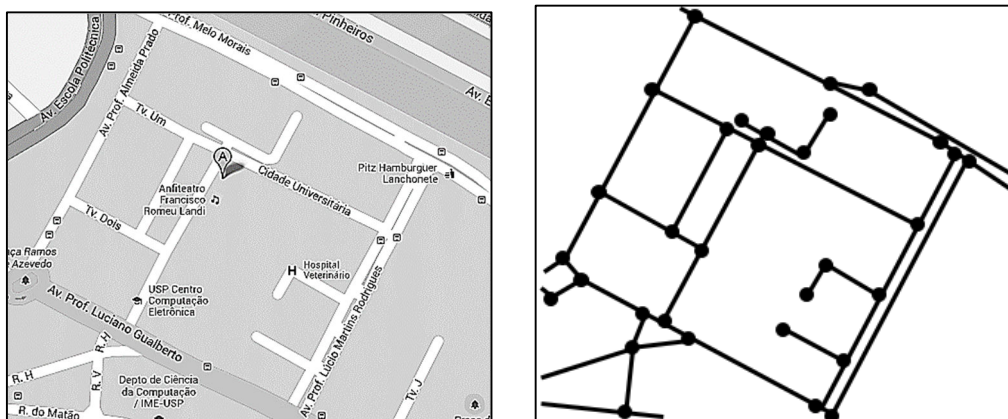
2.3.2.4.1 Mapas de vias

Para veículos autônomos terrestres, o principal tipo de informação para uso em navegação é aquele relacionado à situação de trânsito na qual está inserido e nas vias de navegação sobre as quais opera. Um tipo específico de mapa topológico chamado de mapas de vias (ou rede de vias) tem sido proposto pela literatura científica como um tipo de mapa computacional que permite tratar este tipo de informação.

Um mapa de vias é um modelo bidimensional onde os vértices representam locais a serem atingidos no ambiente e as arestas representam caminhos livres para navegação entre os vértices, geralmente representando vias de transportes (ruas, rodovias, estradas, etc.), cuja estrutura pode ser alimentada por uma base de dados geográficos (Figura 7). É um tipo de mapa utilizado por sistemas de

informações geográficas, sistemas de *web* mapas, ADAS e pela Robótica Móvel desde os trabalhos de Nilsson (1969).

Figura 7: Representação de um mapa em uma rede de vias



Fonte: Google Maps e o Autor.

A construção básica de um mapa de vias utiliza os vértices de um grafo para definir os pontos de entrada e saída de um caminho (regiões onde o veículo altera a sua orientação de navegação), entradas e saídas de intersecção, locais de parada final e sinalizações pertinentes. As arestas são utilizadas para estabelecer um caminho livre em linha reta entre dois vértices no qual o veículo possa navegar sem alterar sua orientação. Mapas de vias, por sua natureza topológica, ainda possuem baixo detalhamento do ambiente que descreve, porém esta limitação pode ser reduzida com a adição de camadas independentes de dados e metadados que acrescentam recursos de visualização, de regulação de tráfego, da classificação da via e dos pontos de interesse (BERNSTEIN; KORNHAUSER, 1996; SPASSOV, 2007).

2.3.3 Sistemas de referência espacial

Os estados do veículo e do ambiente, independentemente dos modelos escolhidos, devem estabelecer um sistema de referência espacial (ou sistema de coordenadas) para definir as regiões do espaço a serem trabalhadas e

permitir o posicionamento elementos no espaço. Dois sistemas são recomendados para utilização em navegação robótica:

- **Sistema de referência local:** mapeia os elementos do ambiente em relação ao veículo (i.e., o veículo é a origem do sistema de posicionamento). Em geral, os elementos são organizados em função das distâncias e ângulos de orientação em relação ao veículo.
- **Sistema de referência global:** estabelece um sistema de referência espacial sobre o ambiente, o qual possui uma origem única e específica sobre a qual todos os elementos do ambiente (incluindo o próprio veículo) obtém sua posição relativa. Sistemas de coordenadas globais são absolutos, no sentido de estabelecer valores de coordenadas únicas para cada região do espaço e, por isto, são utilizados para eventos nos quais o veículo deva compreender de forma não-ambígua sua posição e de outros elementos em relação ao ambiente.

Enquanto um sistema de referência local é recomendado para entender a relação pontual dos elementos do ambiente em relação ao veículo (por exemplo, para desvio de colisão), um sistema de referência global é exigido para parametrizar os modelos de estados do veículo e do ambiente, assim como as operações realizadas pelos diversos processos de navegação autônoma, em especial, aqueles de caráter deliberativo.

No caso de um veículo autônomo terrestre, um sistema de referência global deve ser capaz de permitir o posicionamento sobre a superfície terrestre sobre a qual o veículo realiza sua navegação. A superfície terrestre, no entanto, apresenta diversos fatores que devem ser considerados para a escolha de um sistema de referência apropriado (MONICO, 2007; BLITZKOW *et al.*, 2011):

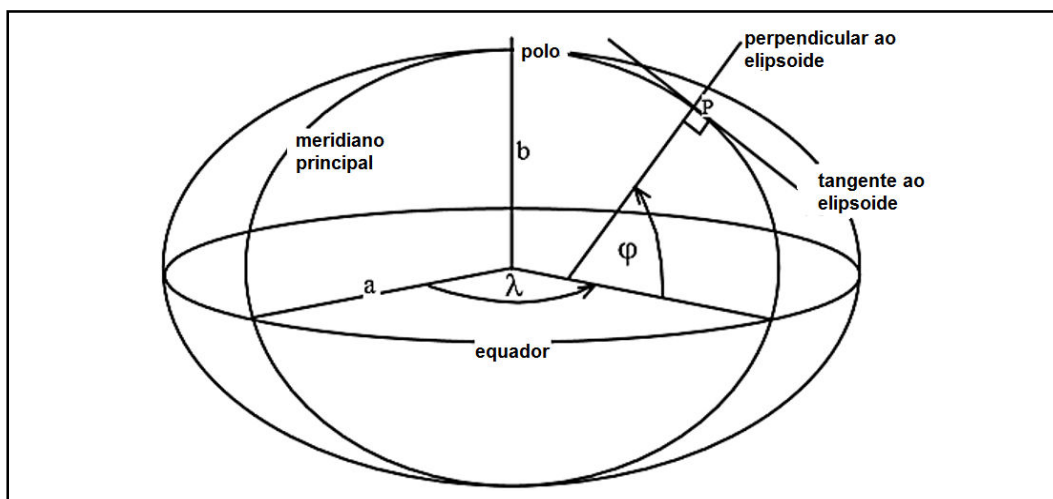
- **A superfície terrestre não é estática:** independentemente do sistema de referência espacial escolhido, as coordenadas convencionadas para um determinado local na superfície terrestre não são estáticas, pois a estrutura do planeta Terra é dinamizada por diversos eventos como movimentos de placas tectônicas, marés oceânicas e terrestres, efeitos de carga sobre a crosta, movimentos da Terra no espaço, entre diversos outros. Nem todos os sistemas de referência conseguem lidar

adequadamente com estas variações, o que pode ser particularmente importante ao se considerar que uma mesma posição pode possuir diferentes coordenadas dependendo do sistema de referência utilizado e de quando foram obtidas as coordenadas em questão. Sistemas modernos de referência espacial estabelecem os valores de coordenadas para uma determinada época⁴ e a obtenção de um valor de posição em uma determinada data é realizada pela aplicações de correções entre a data da medição e a época de estabelecimento de coordenadas.

- **Forma da Terra:** processos de navegação em ambientes de pequena extensão (até 30 km) podem ser trabalhados no modelo plano cartesiano, porém grandes extensões devem considerar a forma da Terra, sua curvatura e outras variáveis de superfície. A forma da Terra e sua superfície são, naturalmente, matematicamente indetermináveis, pela sua complexidade, instabilidade e irregularidades locais. Para definição de sistemas de coordenadas, no entanto, utiliza-se o elipsoide como modelo matemático aproximado da forma da Terra (Figura 8). O elipsoide é um esferoide achatado com dois eixos: um raio equatorial a_e (semieixo maior) e o raio polar b_e (semi-eixo menor). Devido às forças de rotação, o raio equatorial é maior que o raio polar. Esta elipticidade (ou achatamento – representado por f_e) determina o quanto está próximo o esferoide achatado da esfera verdadeira e é dada por $f_e = \frac{(a_e - b_e)}{a_e}$. A posição e orientação de um elipsoide adotado como referência pode ser relacionado à Terra como um todo (geocêntrico), onde o centro geométrico do elipsoide coincide com o centro de massa da Terra, o plano equatorial do elipsoide coincide com o plano equatorial terrestre e busca-se minimizar os desvios em relação ao geoide (este desvio é chamado de ondulação geoidal).

⁴ Por padrão, épocas de referência de coordenadas são dadas em ano juliano (que possui duração média de 365,25 dias), que referencia o ano em questão. A precisão de casas decimais define um período específico do ano.

Figura 8: Elipsoide de revolução com coordenadas geodésicas



Fonte: Miller (2003)

As coordenadas sobre o elipsoide podem ser dadas, principalmente, sob duas formas:

- **Coordenadas geodésicas:** o elipsoide devidamente ajustado às dimensões da Terra e orientado torna-se um referencial adequado para a atribuição de coordenadas a pontos sobre a superfície física da Terra. Estas coordenadas são descritas em termos de coordenadas geodésicas. Considerando a normal como a reta que passa por um ponto de espaço e é perpendicular ao elipsoide, estabelece-se as seguintes coordenadas: latitude (φ) – ângulo entre a normal e o plano equatorial, longitude (λ) – ângulo entre o meridiano principal e o meridiano da posição a ser calculada e altitude geométrica (h) – distância sobre a normal entre a superfície do elipsoide e o ponto da superfície a ter a posição calculada.
- **Coordenadas cartesianas:** uma estrutura cartesiana tridimensional com coordenadas (X, Y, Z) chamada de *Earth-Centered, Earth-Fixed* (ECEF) pode ser criada, associando a origem ao centro do elipsoide, o eixo Z ao semieixo menor e o plano XY rotacionando sobre o eixo maior. A direção de X e Y tem de ser definida e geralmente é adotada de modo que a direção do eixo X esteja alinhado a um meridiano de referência arbitrário.

Atualmente dois sistemas de coordenadas globais em uso permitem estabelecer adequadamente coordenadas sobre a superfície da Terra para efeitos de posicionamento (SEGANTINE, 2005; MONICO, 2007):

- **World Geodetic System-84 (WGS84):** sistema de referência geodésico estabelecido pelo Departamento de Defesa dos EUA e desenvolvido desde 1960 com o objetivo de fornecer posicionamento e navegação em qualquer parte do mundo para necessidades militares e civis. É utilizado desde 1987 como o sistema de referência associado ao sistema de navegação por satélite GPS. O WGS84 provê um sistema de coordenadas, uma superfície de referência padrão (elipsoide) e uma superfície equipotencial gravitacional (geoide) que define o nível do mar. WGS84 é o principal sistema utilizado em diversos sensores e tecnologias por ser o sistema de referência padrão do GPS.
- **International Earth Rotation Service Terrestrial Reference System (ITRS):** sistema mantido desde 1987 pela organização IERS (*International Earth Rotation Service*) e recomendado pela União Astronômica Internacional (*International Astronomical Union* - IAU), pela Associação Internacional de Geodésia (*International Association of Geodesy*- IAG) e pela União Geodésica e Geofísica Internacional (*International Union of Geodesy and Geophysics* - IUGG). O ITRS adota um elipsoide de revolução que coincide com o centro de massa da Terra (geocentro) e com o eixo de revolução coincidente com o eixo de rotação da Terra. O eixo OX é orientado na direção do Meridiano Internacional de Referência, o eixo OZ na direção do Polo Internacional de Referência, e o eixo OY a 90° de OX. A definição do ITRS compreende o modelo geométrico *Geodetic Reference System 1980* (GRS80), o que torna o ITRS semelhante ao sistema WGS84, excetuando uma pequena variação no achatamento terrestre. Isto faz com que em termos práticos não haja necessidade de transformação entre os sistemas. No entanto, considera-se que o ITRS é melhor realizado do que o WGS84, sendo recomendada, sempre que possível, a utilização do ITRS para redes geodésicas e mapeamento .

Os parâmetros do elipsoide para cada sistema necessários para navegação terrestre são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3: Parâmetros definidores do GRS80 e do WGS84

Parâmetros	Sigla	GRS80	WGS84
Semieixo maior do elipsoide (m)	a_e	6378137	6378137
Achatamento geométrico	f_e	1/298,257222101	1/298,257223563

Fonte: Moritz(2000) e Segantine (2007)

Na arquitetura de veículo autônomo proposta neste trabalho, utiliza-se o sistema WGS84 como sistema de referência padrão. A justificativa é o fato do WGS84 ser o sistema de referência utilizado pelo GPS e por diversas tecnologias disponíveis no mercado. Desta forma, a adoção do sistema permite a integração do veículo com diversos recursos já existentes minimizando as necessidades de processamento das transformações necessárias de/para outros sistemas de referência.

2.4 PROCESSOS DE NAVEGAÇÃO

2.4.1 Aquisição de Missão

Missão descreve o estado final a ser atingido pelo robô a partir do seu estado atual. No caso dos veículos autônomos terrestres, a missão, em geral, representa a posição final em termos de coordenadas globais que o veículo deve alcançar. No entanto, a missão pode descrever também ações, condições lógicas ou características desejáveis (do ambiente ou do veículo). A missão é o parâmetro global (objetivo) a ser considerado para a Tomada de Decisão, já que as ações do veículo serão realizadas de forma cíclica enquanto a posição atual do veículo não for igual à missão (teste do objetivo).

Em um veículo autônomo terrestre, a aquisição da missão deve ser realizada mediante interfaces adequadas que permitam ao usuário inserir os parâmetros

do estado final em um formato em um nível de abstração adequado e amigável a seres humanos de qualquer tipo de formação cultural e técnica. Interfaces comuns podem incluir comandos baseados em voz, telas de toque, entre outras, embarcadas na estrutura do veículo ou não (neste caso, controlado por um dispositivo externo, tal como um *smartphone*). Independentemente da técnica utilizada, o sistema que provê a interface deve ser capaz de converter estes dados em um formato não-ambíguo, preciso e adequado para interpretação do sistema de navegação do veículo. Os valores de entrada devem ser validados de acordo com o sistema de referência global utilizado e convertidos pelo sistema em um formato adequado para os processos de navegação. De forma simplificada, se o tipo de modelo do ambiente aplicado pelo veículo para navegação é um modelo métrico, a missão especificada deve ser vinculada a um conjunto de células ou figuras geométricas específicas daquela região do espaço. Em mapas topológicos, a missão é associada a um nó ou aresta de um grafo conforme a conveniência.

2.4.2 Percepção (Sensoriamento)

Percepção (ou Sensoriamento) designa ao conjunto de processos que permitem ao veículo obter dados dos sensores e realizar as transformações necessárias para gerar representações do estado do ambiente e do próprio veículo. A construção do processo de percepção engloba responder às seguintes questões:

- Quais elementos do ambiente devem ser reconhecidos pelo veículo ?
- Quais são os sensores disponíveis e suas características específicas ?
- Quais as estruturas de dados para as quais os dados dos sensores devem ser transformados ?
- Quais os algoritmos que permitem realizar as transformações entre os dados obtidos dos sensores e as estruturas de dados escolhidas?

Pela natureza das ações de um veículo autônomo terrestre, os principais elementos do ambiente que devem ser tratados para modelar uma situação de trânsito são:

- Posição do veículo em um sistema de referência global (i.e., a relação do veículo com o ambiente);
- Posição dos elementos naturais e artificiais do ambiente, tanto estáticos (que não mudam sua posição no tempo) quanto dinâmicos, (que modificam sua posição no tempo) em relação ao veículo;
- Espaço atravessável no tempo, determinando-se as possibilidades de colisão presentes e futuras;
- Sinalização de trânsito, integração com outros veículos e comunicação com os componentes sistema de transportes;
- Dados internos produzidos pelos componentes do próprio veículo;
- Qualquer outro elemento que interfira na navegação do veículo.

Condutores humanos, por suas limitações sensoriais, não conseguem distinguir todas as variáveis possíveis envolvidas em uma situação de trânsito, tendendo a abstrair e priorizar os dados mais adequados de acordo com seus modelos mentais. Quantitativamente, um veículo autônomo terrestre com sensores adequados pode processar maior quantidade de informações do que um ser humano comum, porém qualitativamente, o projeto que permite organizar os sensores em uma estrutura capaz de extrair dados do ambiente para suportar a Tomada de Decisão com qualidade similar ou superior a um condutor não é algo trivial. Espacialmente, o veículo deve possuir sensores capazes de cobrir todos os pontos verticais e horizontais adjacentes à sua estrutura que possam possuir restrições que impeçam o veículo de ocupar uma determinada região do espaço (não apenas em termos de ocupação de espaço, mas também em termos de espaço não-navegável como, por exemplo, em relação a superfícies inapropriadas para navegação ou que não possam ser ocupadas por um veículo de um determinado tipo). Temporalmente, o veículo deve manter uma estimativa conservadora do futuro, i.e., tratar o maior número de possibilidades de ocorrência dos eventos em um mesmo modelo, permitindo detectar elementos e realizar ações no veículo em um tempo adequado (BENENSON, 2008).

Para desenvolver um sistema de percepção, existem diversas categorias e tipos de sensores, adequados para contextos específicos. Nesta pesquisa, não se considera as características específicas dos sensores (pois podem variar de veículo para veículo) mas classificam-se os sensores em grupos genéricos com

características comuns e adotam-se interfaces padronizadas para estes grupos, de modo que os dados sensorizados sejam fornecidos ao veículo independente de sua origem.

Considera-se, porém, que qualquer sistema de percepção, independentemente dos tipos de sensores utilizados, obtém dados com as seguintes limitações (BENENSON, 2008; RUSSELL; NORVIG, 2010):

- **Incompletos:** em geral não é possível obter o conhecimento completo do ambiente através dos sensores, ou seja, não é possível reconhecer todos os elementos do ambiente necessários para uma Tomada de Decisão adequada.
- **Ruidosos:** os dados obtidos pelos sensores podem ser incompletos ou contaminados pela presença de outros tipos de dados desnecessários para o processo de navegação ou pelo comportamento dinâmico dos dados através do tempo.
- **Defasados:** um determinado dado obtido pelo sensor raramente é processado de forma integral no momento de sua aquisição, mas é utilizado apenas depois de ser transformado e disponibilizado ao sistema, o que pode torná-lo defasado para utilização.

Estes problemas podem ocorrer por diversos motivos:

- **Natureza dos sensores:** construído com características específicas de tecnologia e operação, cada tipo de sensor pode apresentar performance diferente conforme o contexto que é aplicado. Para um mesmo elemento do ambiente, dois ou mais sensores podem realizar medições diferentes e, mesmo, conflitantes.
- **Comportamento dos sensores:** sensores podem não atuar sob condições ideais para percepção do ambiente. Variáveis externas aos sensores (por exemplo, temperatura do ambiente), assim como variáveis e eventos próprios dos sensores (como deslocamento de posição, obsolescência e quebra do equipamento) podem alterar a capacidade de medição e processamento de dados.
- **Comportamento dos elementos do ambiente:** determinados elementos do ambiente podem não ter suas características ou

comportamento no tempo medidas adequadamente por um determinado sensor, quer pela limitação dos sensores, quer pelo uso de sensores inapropriados.

A redução dos erros de medição para níveis adequados pode ser realizada por um conjunto de diferentes técnicas: além da adoção de procedimentos básicos como calibração e manutenção dos sensores, comumente adotam-se sistemas que garantam a redundância de sensoriamento (de modo a utilizar dois ou mais sensores para medir uma mesma característica do ambiente) e a consequente minimização do erro através da fusão de dados em nível de sinal (fusão estatística - por exemplo, método dos mínimos quadrados, filtros de Kalman) ou em nível de dados (fusão probabilística - por exemplo, redes bayesianas, lógica *fuzzy*) (THRUN, 1998; BENENSON, 2008; DUDEK; JENKIN, 2010).

A escolha de quais tipos de estruturas de dados devem ser utilizadas para consolidar os dados obtidos pelo processo de percepção são dependentes das necessidades de armazenamento e dos algoritmos que deverão ser aplicados sobre estes dados. Não há consenso, na literatura científica, sobre o melhor tipo de estrutura ou armazenamento de dados a ser utilizado neste caso: o modelo adotado pode envolver a não-adoção de uma estrutura de dados (i.e., os dados obtidos são diretamente processados, sem armazenamento), listas (simples, ligadas ou duplamente ligadas), matrizes, redes neurais e outros tipos de estruturas. Em geral, busca-se conciliar velocidade e integridade adequada nas operações de inserção, busca e atualização de dados. Na arquitetura proposta neste trabalho, os dados de percepção são armazenados em listas que fornecem informações necessárias para composição dos diferentes estados necessários à navegação.

2.4.3 Posicionamento (Localização)

Posicionamento robótico (ou localização robótica) define a capacidade do veículo autônomo terrestre obter o seu estado atual (posição) em relação ao ambiente de navegação. É um processo essencial para a Tomada de Decisão pois permite estabelecer onde o veículo está, se atingiu a missão proposta e sua

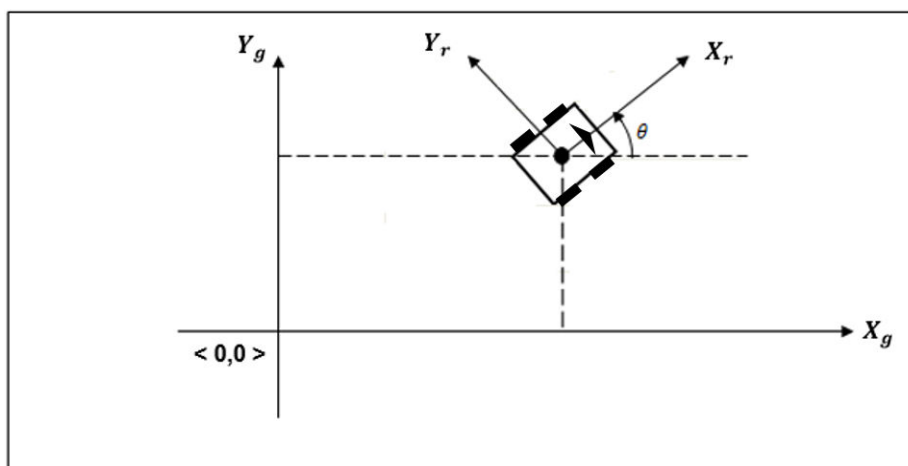
relação com outros elementos do ambiente (DURRANT-WHYTE, 2001; DUDEK; JENKIN, 2010; RUSSELL; NORVIG, 2010).

Posicionamento robótico pode ser descrito sob duas formas:

- **Posição local:** que descreve os elementos do ambiente em relação ao veículo (i.e., a origem do sistema de posicionamento é sempre o veículo). É realizada através de um sistema de referência espacial local.
- **Posição global:** que descreve o veículo em relação ao ambiente, dentro de um sistema de referência espacial convencionado. É realizada através de um sistema de referência espacial global.

A posição completa do veículo é dada pela integração entre sua posição local e sua posição global. Considerando-se que a posição local do veículo seja expressa por duas coordenadas cartesianas (X_r, Y_r) e a posição global expressa por duas coordenadas cartesianas e sua direção (X_g, Y_g, θ) , a integração entre os sistemas pode ser realizada conforme a Figura 9. Nesta integração, estabelece-se, por convenção, que $\theta = 0$ rad (ou $0,0^\circ$, em graus decimais) significa que o veículo está direcionado para o eixo X_g , enquanto $\theta = 0,5\pi$ rad (ou $90,0^\circ$, em graus decimais) significa que o veículo está direcionado para o eixo Y_g (SIEGWART; NOURBAKHSH, SCARAMUZZA, 2011; THRUN; BURGARD; FOX, 2005; BENENSON, 2008; SECCHI, 2008).

Figura 9: Coordenação entre os sistemas de posicionamento local e global



Fonte: Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011).

Esta integração não possui, ainda, uma solução definitiva que possa ser aplicada em qualquer contexto de navegação. Quando o veículo já possui uma posição completa preliminar, novas posições podem ser rastreadas continuamente: a partir da posição inicial existente, mantém-se uma estimativa de novas posições através do monitoramento dos movimentos do veículo (utilizando, por exemplo, odometria). Quando não é possível obter uma posição completa preliminar, a obtenção de novas posições exige obter dados do ambiente, tratamento de ambiguidades e manutenção de hipóteses múltiplas sobre onde o veículo pode estar (BURGARD *et al.*, 1998; THRUN; BURGARD; FOX, 2005).

As técnicas aplicadas para solucionar os problemas de posicionamento robótico podem ser segmentadas em dois grupos principais: posicionamento absoluto e posicionamento relativo.

2.4.3.1 Posicionamento absoluto

O posicionamento absoluto, no contexto da Robótica Móvel, obtém a posição do veículo em um sistema de coordenadas convencional, captando dados de sensores específicos de posicionamento, sem a necessidade de conhecimento de medições de posição anteriores. Técnicas de posicionamento absoluto são consideradas mais acuradas do que as técnicas relativas, pois os erros de medição não tendem a se acumular com múltiplas integrações. No entanto, sensores de posicionamento absolutos podem não possuir uma taxa de amostragem consistente para manter uma posição constante e precisa do veículo, especialmente se estiver em movimento. Nestes casos, a combinação com técnicas de posicionamento relativo podem suprir os dados necessários para manter uma amostragem de dados adequada.

As técnicas de posicionamento absoluto podem ser divididas em dois tipos: aquelas baseadas em elementos do ambiente e aquelas baseadas em mapas.

O posicionamento baseado em elementos do ambiente faz com que o veículo obtenha sua posição e orientação em relação a elementos naturais ou artificiais do ambiente que possuam posições conhecidas. Os elementos podem ser de

dois tipos (BORENSTEIN; EVERETT; FENG, 1996; BORENSTEIN *et al.*, 1997; SECCHI, 2008; DUDEK; JENKIN, 2010):

- **Ativos:** estações de transmissão, em geral de radiofrequência, fixas ou móveis que enviam dados de sua posição. Para posicionamento o veículo utiliza técnicas de trilateração e triangulação em relação a estas estações. As principais tecnologias que utilizam a localização por marcos ativos são aquelas baseadas em rastreamento de satélites, em especial, os sistemas de navegação global por satélites (como o GPS).
- **Passivos:** elementos do ambiente (naturais ou artificiais) com posição conhecida que não enviam dados mas possuem uma forma física (como figuras geométricas, códigos de barras, códigos de cores, marcas no solo, placas, etc.) que permita seu reconhecimento por parte dos sensores do veículo (como câmeras de vídeo, sensores de som, etc.). Pela sua natureza estática, em geral, elementos passivos exigem que o seu sensoriamento seja realizado em uma condição ideal (iluminação, posição, etc.) nem sempre possível de ser obtida pelo veículo.

O posicionamento baseado em mapas (*map matching*) realiza a associação dos dados do ambiente obtidos dos sensores com os dados de um mapa computacional embarcado no veículo ou que possa ser acessado por este. Se o mapa é do tipo métrico, busca-se determinar a célula em que o veículo ocupa no ambiente. Se o mapa é do tipo topológico, busca-se o vértice com a posição mais próxima da medição. Um terceiro modelo pode utilizar um mapa topológico em um nível global (para localizar em qual nó ou região do grafo está a posição) e posteriormente fornecer a localização em um mapa do tipo métrico (BORENSTEIN; EVERETT; FENG, 1996; FILLIAT; MEYER, 2003; SECCHI, 2008).

2.4.3.2 Posicionamento relativo

As técnicas relativas de posicionamento (também conhecidas na língua inglesa como *Deduced Reckoning* e *Dead Reckoning*), no contexto da Robótica Móvel, têm como objetivo determinar uma nova posição a partir de uma posição

anteriormente fixada (relativa ou absoluta) baseando-se nas variáveis de movimentação do veículo, como velocidade e direção (BORENSTEIN; EVERETT; FENG, 1996; FILLIAT; MEYER, 2003). São técnicas de boa acurácia e previsibilidade para locomoções em períodos e distâncias reduzidos, mas fatores como imprecisão mecânica dos atuadores de um robô móvel e irregularidades do terreno de navegação podem trazer erros à estimativa gerada, acumulando-se para grandes períodos de locomoção. Desta forma, raramente técnicas relativas de posicionamento são utilizadas de forma isolada, sendo combinadas com técnicas de posicionamento absoluto (BORENSTEIN *et al.*, 1997).

As duas principais técnicas de posicionamento relativo utilizadas no contexto da Robótica Móvel são (BORENSTEIN; EVERETT; FENG, 1996; BORENSTEIN *et al.*, 1997; DURRANT-WHYTE, 2001; SECCHI, 2008; COBB; CLARK, 2010):

- **Odometria:** técnica que estima a posição do veículo a partir da combinação entre uma posição inicial conhecida (relativa ou absoluta) e de dados obtidos de sensores que medem a revolução das rodas, que medem a direção do veículo ou que são baseados em efeito Doppler. A integração temporal do movimento pode levar à acumulação de erros sistemáticos (aqueles causados pelas imperfeições físicas do veículo) e de erros aleatórios (aqueles provocados pela interação do veículo com o ambiente). Estes erros podem interferir na acurácia dos valores de posição, em especial, das variáveis de orientação, que podem ser de difícil correção.
- **Sistemas de Navegação Inercial:** navegação inercial é o processo de navegação que utiliza dados sobre posição, velocidade, atitude⁵ e direção de um veículo obtidos de sensores inerciais como acelerômetros e giroscópios, que são comumente utilizados de forma combinada. Nestes sistemas, os giroscópios fornecem a medida de velocidade angular, permitindo determinar a atitude de um veículo, enquanto os acelerômetros medem a aceleração linear. Os sistemas inerciais também podem sofrer acúmulo de erros de integração mas,

⁵ Posição de um corpo determinada pela inclinação dos seus eixos em relação a um sistema de referência.

em geral, obtém dados mais precisos do que aqueles obtidos por odometria.

2.4.4 Planejamento de rotas

Planejamento de rotas (também chamado de planejamento de trajetória ou apenas planejamento), no contexto da Robótica Móvel, é o processo de navegação que tem como objetivo estimar um conjunto de estados livres de colisão no ambiente que possa ser ocupado pelo veículo desde seu estado atual até a missão proposta (MEYER; FILLIAT, 2003).

Seres humanos realizam seu planejamento de rota através do estabelecimento de um conjunto de lugares a serem visitados ordenadamente em direção à posição final desejada a partir da sua posição atual. O processo envolve, então, o armazenamento mental das características vinculadas a cada lugar que deve ser visitado e a tentativa de associação destas características com as informações apreendidas pelos sentidos do condutor. Determinar o conjunto de lugares que compõem uma rota ideal entre uma posição inicial e uma missão é dependente do aprendizado, experiência prática e capacidade de inferência do condutor.

Sob o ponto de vista da navegação robótica, uma rota ideal é aquela na qual o veículo pode locomover-se de onde está para a posição final desejada em linha reta (menor distância possível) sem alterações de orientação. No entanto, eventos dinâmicos e estáticos impedem que a navegação seja realizada desta forma. Enquanto sistemas reativos tendem a desconsiderar qualquer forma de planejamento a longo prazo, sistemas deliberativos e híbridos adotam a segmentação da rota a ser realizada em um grafo cujos vértices são as regiões a serem ocupadas pelo veículo e as arestas são caminhos livres para navegação atravessáveis pelo veículo. O grafo é construído de forma que cada vértice seja uma região do espaço no qual o veículo altera sua orientação, enquanto uma aresta é um caminho na qual o veículo não altera sua orientação entre dois vértices.

O modo como o planejamento de rotas pode ser realizado é dividido em duas abordagens, não necessariamente excludentes:

- **Abordagem global:** possui uma representação de todo o ambiente de navegação no qual o veículo pode se locomover e aplica algoritmos de busca para determinar o custo de todas as rotas possíveis, obtendo posteriormente a rota global mais adequada para cumprir a missão. Esta abordagem permite, preliminarmente, determinar se uma missão é alcançável ou não. No entanto, a abordagem global pode ter alto custo computacional de processamento para achar uma rota adequada em ambientes de grande extensão.
- **Abordagem local:** nesta abordagem, o veículo planeja o melhor caminho a ser realizado de acordo com seus dados internos, algoritmos de busca e dados dos sensores. Como o planejamento é realizado no momento da locomoção, em geral, a rota planejada neste caso possui menor alcance do que aquela obtida pelo planejamento global, porém é mais aderente ao contexto no qual o robô móvel está inserido.

Considerando-se estas abordagens, permite-se gerar dois tipos de planejamento:

- **Preliminar à navegação:** os dados de planejamento são estabelecidos preliminarmente e não há alterações significativas das regiões a serem ocupadas no ambiente durante o processo de navegação.
- **Durante a navegação:** os dados de planejamento são estabelecidos globalmente, porém o sistema de planejamento pode, periodicamente, verificar a rota inicial planejada e alterá-la, parcial ou completamente, para otimizar o processo de navegação do veículo. Neste tipo de planejamento é importante que o veículo tenha a capacidade de finalizar as ações de planejamento atualmente em desenvolvimento e apenas permita a mudança de planejamento quando esta não colocar a navegação em situação de insegurança.

Para realizar o planejamento, um mapa computacional do ambiente deve estar disponível preliminarmente ao veículo. Mapas computacionais para fins de planejamento podem ser produzidos pela integração de bases de dados de variadas fontes (criados ou não para fins de navegação robótica) ou pela guiagem do veículo por um condutor por uma série de lugares no ambiente, armazenando os dados obtidos destes lugares e os movimentos necessários para realizar a transição entre os lugares sensorizados. Sobre o mapa devem ser aplicados algoritmos de planejamento que permitam definir as posições e ações que o veículo espera ocupar no ambiente em direção à sua missão. Os algoritmos de planejamento podem ser segmentados em dois tipos: planejamento sobre mapas topológicos e planejamento sobre mapas métricos.

Para mapas topológicos, o planejamento de rota pode ser realizado através de técnicas de busca em grafos para geração de caminhos de menor custo: calculando-se o vértice inicial (posição atual do veículo) e o vértice final (missão) obtém-se um conjunto de vértices e arestas que sejam visitados uma única vez e que interliguem os vértices inicial e final. A escolha de quais arestas e vértices devem ser selecionados para a interligação pode ser realizada pelo custo do caminho a ser percorrido, como a quantidade de arestas (grafo simples) ou sobre o peso das arestas (grafo ponderado) calculado conforme a conveniência do desenvolvimento (extensão da via, tipo de terreno, etc.). Os principais algoritmos de busca de menor caminho incluem Dijkstra, Busca A* (A-Star), D* (D-Star), Floyd-Warshall, e programação dinâmica (CHOSET *et al.*, 2005; MEYER; FILLIAT, 2003; DUDEK; JENKIN, 2010).

Para mapas métricos, as principais técnicas utilizadas consistem em converter o mapa métrico para um mapa topológico, considerando cada célula ou região métrica como um vértice e as adjacências como arestas de um grafo. Desta forma, monta-se um grafo que unindo vértices livres de colisão e aplica-se os algoritmos anteriormente citados para planejamento de rota em mapas topológicos (CHOSET *et al.*, 2005; MEYER; FILLIAT, 2003).

2.4.5 Estratégia de Movimento

Estratégia de Movimento é o conjunto de processos que define qual ação de locomoção deve ser realmente executada em uma determinada situação de trânsito.

Seres humanos realizam a Estratégia de Movimento determinando qual a próxima região a ser atingida no ambiente, determinando a distância e orientação que pode percorrer para alcançar a região desejada. Conforme a situação de trânsito presente, o condutor pode acelerar ou desacelerar o veículo (conforme a distância em relação a outros elementos do ambiente) e mudar a orientação (para desvio de colisão). Após realizar uma ação, o condutor verifica o quanto se desviou da rota ideal desejada e realiza ações de correção neste sentido, até atingir a região desejada. Este ciclo é realizado pelo condutor até atingir a missão proposta.

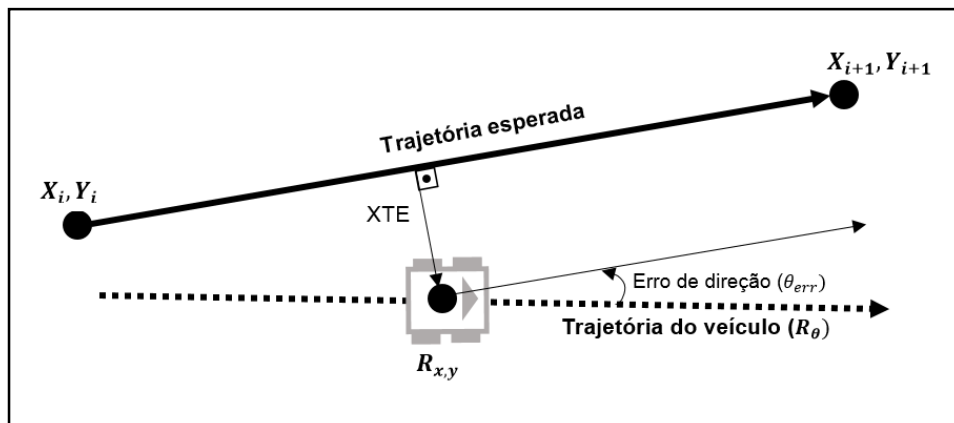
A Estratégia de Movimento robótica pode ser dividida nas seguintes etapas: (a) determinar a ação (orientação e aceleração do veículo) a ser realizada, (b) obter dados do ambiente, (c) estabelecer um conjunto de possibilidades de ação considerando estes dados, (d) escolher a ação mais adequada para ser realizada (i.e., mais próxima daquela inicialmente planejada) e (e) executar realmente a ação.

A técnica simples de Estratégia de Movimento para veículos autônomos terrestres consiste na utilização de direção constante (THRUN, 2014): obtém-se a posição atual do veículo e a próxima posição do ambiente que deve ser alcançada (por exemplo, o próximo vértice da rota planejada), calculando-se o ângulo de orientação e distância entre as posições. Direciona-se o veículo para a direção da posição a ser alcançada, seguindo em linha reta até atingi-la. Ao atingir a região desejada, obtém-se nova região a ser atingida e reinicia-se o ciclo de ações, até que o veículo atinja a região final de navegação. Em navegações reativas e híbridas, o trajeto pode ser alterado para desviar de uma possível restrição no ambiente, necessitando de correções posteriores para que o veículo se redirecione para a rota proposta. Pelas alterações e correções contínuas, além dos acúmulos dos erros das ações de navegação (que podem

ser oriundos dos atuadores, de variações no terreno, entre outros) a direção constante não é recomendada para uso em veículos autônomos terrestres, exceto em situações controladas.

Uma opção de maior qualidade é permitir ao veículo corrigir o erro de navegação baseado na rota que deve seguir integrando seus erros de navegação ao longo do tempo (THRUN, 2014). Chama-se de erro de desvio lateral (em inglês *cross-track error* - XTE) à diferença entre o percurso a ser seguido e o percurso atual do veículo, sendo medida perpendicularmente à rota desejada. Outro erro que pode ser estimado é o erro da direção do veículo (HODO, 2010) (Figura 10).

Figura 10: Relação entre percurso e trajetória do veículo.



Fonte: O Autor.

O cálculo do XTE pode ser realizado de forma que, considerando-se $R_{X,Y}$ como a posição real do veículo e a ligação entre duas coordenadas $[X_i, Y_i]$ e $[X_{i+1}, Y_{i+1}]$ como o trajeto de referência que deve ser seguido (HODO, 2010; THRUN, 2014):

$$XTE = \frac{(Y_i - Y_{i+1}) R_X + (X_{i+1} - X_i) R_Y + (X_i Y_{i+1}) - (X_{i+1} Y_i)}{\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}} \quad (2.3)$$

O cálculo do erro da direção pode ser realizado sob a seguinte forma, considerando-se R_θ como a orientação do veículo em relação ao sistema de referência espacial (HODO, 2010):

$$\theta_{err} = R_{\theta} - \arctan\left(\frac{X_{i+1} - X_i}{Y_{i+1} - Y_i}\right) \quad (2.4)$$

Uma maneira de tratar os efeitos de *XTE* é a utilização de um sistema de controle proporcional-integral-derivativo (PID) cujo resultado é a correção entre a posição do veículo e a rota que deve seguir, sendo este resultado associado à orientação que o veículo deve realizar em um determinado momento do tempo (DUDEK; JENKIN, 2010; THRUN, 2014). Neste sentido, opera-se a seguinte equação de controle, onde considera-se α como a orientação na qual o veículo deverá realizar seu movimento (em radianos):

$$\alpha = K_p XTE + K_i \sum XTE + K_d \frac{d}{dt} XTE \quad (2.5)$$

Onde $K_p XTE$ é o fator proporcional (P) que descreve o erro atual, sendo o produto do ganho K_p e do *XTE* obtido. O fator integral (I) descreve os erros do passado, sendo representado por $K_i \sum XTE$ que é o produto entre o ganho K_i e o valor acumulado de todos os valores dos *XTE* anteriores. O fator derivativo (D) descreve uma comparação entre os erros passados e o erro presente com o intuito de obter o erro futuro. O fator derivativo é representado pelo produto do ganho K_d e da derivação entre o valor atual e os valores passados de *XTE*. Os valores dos ganhos K_p , K_i e K_d a serem utilizados são dependentes do contexto de utilização e são obtidos por simulação (na qual se gera um conjunto de ciclos de processamento até obter os valores adequados para uso) ou por ajuste manual (na qual o desenvolvedor testa um conjunto de parâmetros até obter os valores adequados de uso). Um aprofundamento dos fundamentos dos sistemas de controle pode ser obtido em Ogata (2010).

Enquanto o valor de α é o valor de orientação a ser realizada pelo veículo, o valor de velocidade, de forma intuitiva, deverá ser a diferença entre a atual posição do veículo e a próxima região da rota a ser alcançada. Estes valores, no entanto, não podem ser adotados diretamente para a ação, mas devem ser integrados com dados do ambiente para compreender a situação atual do

veículo, estabelecendo um conjunto de ações possíveis a serem realizadas pelo sistema. A modelagem das possibilidades de ação e dos pesos relacionados a cada possibilidade pode ser realizada de diferentes formas como árvores de decisão, redes neurais e outras conforme a conveniência. Neste trabalho, desenvolve-se, no Capítulo 3, uma estrutura de dados específica chamada Grade de Prioridades para realizar esta combinação.

Após a Tomada de Decisão sobre qual movimento executar sobre o ambiente, os valores de orientação e distância ajustados devem ser repassados aos atuadores para ação de locomoção. Em um veículo autônomo, estes valores devem ser convertidos em ações que possam ser aplicadas pelos sistemas do veículo. No entanto, mesmo que os valores de orientação e distância sejam repassados adequadamente, não há garantias que sejam convertidos em uma ação apropriada pelos atuadores, podendo gerar resultados imprevisíveis (THRUN; BURGARD; FOX, 2005).

2.5 FONTES DE DADOS PARA SUPORTE À NAVEGAÇÃO

Seres humanos dependem de dois tipos de dados para executar ações de navegação: aqueles obtidos diretamente do ambiente de navegação mediante os sentidos e aquelas já preliminarmente consolidadas em modelos mentais para uso em necessidades de reação e planejamento. Da mesma forma, os processos de navegação de um veículo autônomo terrestre dependem de duas fontes de dados principais para realizar suas atividades: (a) aquelas obtidas diretamente do ambiente de navegação – adquiridas dos sensores – e (b) aquelas já preliminarmente consolidadas, formatadas e disponibilizadas para processos específicos do veículo.

No contexto de um veículo autônomo, as principais fontes de dados preliminares a serem consideradas envolvem a descrição do sistema de transportes (como sinalização, regras de trânsito, fluxo de veículos, etc.), informação geográfica adicional (como tipo de terreno, elevação, etc.), além de elementos naturais (por exemplo, vegetação) e artificiais que possam interferir na navegação autônoma. Pela dificuldade em se modelar elementos dinâmicos de comportamento

imprevisível (que devem ser tratados, então, pelos sensores do veículo), dados preliminares devem tratar, essencialmente, eventos estáticos ou de comportamento previsível do ambiente.

A aquisição de dados por parte do veículo pode ser realizada de duas formas:

- **Via comunicação:** o veículo adota um sistema de comunicação que permite receber, transmitir ou receber/transmitir dados conforme a necessidade com outros veículos, com a infraestrutura de transporte, etc.). Os dados obtidos pela comunicação podem ser imediatamente utilizados e descartados, ou podem ser armazenados no veículo para uso futuro.
- **Via embarcamento:** o veículo recebe preliminarmente os dados, armazenando-os para uso futuro por parte da navegação. A aquisição de dados pode ser por comunicação, pela utilização de uma base de dados em mídia portátil ou por outras técnicas.

Cada abordagem possui suas vantagens e desvantagens específicas de uso: a comunicação de dados permite atualização mais eficaz, dinâmica, com acesso a múltiplas bases de dados de interesse e a tamanhos de dados variáveis de acordo com a conveniência, porém é dependente de um sistema de comunicação estável e adequado para manter o sistema atualizado. A utilização de dados embarcados torna o acesso aos dados mais rápido e independente de fontes externas, porém, em diversas situações, os dados podem estar defasados em relação ao ambiente. Outro problema com dados embarcados é que estes podem ser, em geral, de grande volume e não poderem ser tratados adequadamente pelos recursos computacionais disponíveis ao veículo.

Pesquisas em robótica móvel comumente desenvolvem seus próprios formatos e bases de dados para navegação em escala reduzida, geralmente adequados para navegação em ambientes controlados e de testes. Para o tipo de navegação exigido em veículos como veículos autônomos, coleções de dados mais extensas e de melhor qualidade podem ser exigidas.

Atualmente, há três tipos principais de dados a serem considerados neste sentido (SPASSOV, 2007; RACKLIFFE; YANCO; CASPER, 2011):

- **Dados globais:** dados produzidos por agências nacionais e internacionais para atividades gerais como previsão do clima, estudos espaciais diversos, etc. Abrangem grandes distâncias geográficas, mas não são adequados para navegação robótica por não oferecer um nível de detalhamento adequado do ambiente.
- **Dados governamentais:** dados de mapeamento produzidos e mantidos por um governo para realização de suas atividades. Em geral, possuem maior detalhamento do que os dados globais e estão em formato aberto ao grande público. No entanto, devido ao alto custo técnico e financeiro envolvido no processo de mapeamento, costumam não ser atualizados em uma periodicidade conveniente.
- **Dados organizacionais:** dados obtidos por uma organização como suporte aos seus processos ou para sua atividade-fim. As bases de dados costumam estar em formato fechado e proprietário, possuindo maior custo de aquisição por parte do público externo e, em geral, a acurácia e precisão do mapeamento não são explicitamente conhecidos (SPASSOV, 2007; RACKLIFFE; YANCO; CASPER, 2011).

A adoção de veículos autônomos pressupõe a integração destes três tipos de dados, de forma a fornecer a estes veículos os dados necessários a sua navegação. Ainda que diferentes tipos de serviço de fornecimento específico de dados possam ser oferecidos, deve-se garantir que os dados sejam os mais atualizados possíveis e forneçam sempre a capacidade mínima do veículo realizar suas ações. Desta forma, regulamentação governamental pode ser necessária para estabelecer estes requisitos.

2.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, analisou-se a navegação realizada por condutores humanos e as propostas de automatização desta navegação. Diferentemente de outros segmentos da Robótica Móvel, a automatização da condução veicular exige especial tratamento sobre como os processos de navegação são realizados devido às necessidades de segurança e confiabilidade.

Os modelos de navegação robótica propostos pela literatura dividem-se em três abordagens: (a) a navegação deliberativa, na qual as ações que o veículo irá realizar já são preliminarmente conhecidas, não se utilizando dados sobre o ambiente, (b) a navegação reativa, na qual as ações do veículo são realizadas conforme a ocorrência de eventos no ambiente e (c) a navegação híbrida, que combina ações deliberativas e reativas para tratar o ambiente. Enquanto outras formas de navegação podem ser realizadas em contextos específicos, o tipo de navegação mais recomendado para os cenários de atuação dos veículos autônomos terrestres é a navegação híbrida.

O tipo de navegação escolhido define os processos e as estruturas de dados que organizam a Tomada de Decisão em um veículo autônomo terrestre. A composição de um sistema de navegação e da Tomada de Decisão autônoma passa por dois projetos: os modelos de dados sobre os quais o sistema irá realizar seu processamento e gerar as ações e os processos envolvidos na navegação autônoma.

Dois tipos de modelos servem para representar os eventos que o veículo deve tratar: (a) um modelo de estado que descreva o veículo e (b) um modelo de dados que descreva o ambiente. Nesta pesquisa adotou-se o modelo do biciclo para representar o estado do veículo por se tratar de um modelo neutro quanto aos diferentes desenvolvimentos que podem ser realizados e de cinemática simples. Sobre os modelos de estado do ambiente, estes são comumente representados sob a forma de mapas computacionais que podem ser de quatro tipos: (a) mapas em grade (que dividem o ambiente em células homogêneas no ambiente bidimensional), (b) mapas geométricos (que dividem o ambiente em figuras geométricas conforme a conveniência), (c) mapas sensoriais (baseados em nuvens de pontos obtidos por sensores específicos) e (d) mapas topológicos (que modelam o ambiente na forma de um grafo).

Cada processo de navegação (aquisição de missão, posicionamento, planejamento de rota e estratégia de movimento) é, então, descrito em função dos modelos de estados, demonstrando-se as diversas técnicas necessárias para compor um sistema de Tomada de Decisão adequado sobre navegação veicular.

3 ARQUITETURA VAT-EVA

“Science, like art, is not a copy of nature but a re-creation of her.”

Jacob Bronowski, *Science and Human Values* (1956)

Este capítulo apresenta a proposta de uma arquitetura conceitual e lógica chamada de VAT-EVA (Veículo Autônomo de Transporte Terrestre da Equipe do Veículo Autônomo), que fornece uma estrutura de Tomada de Decisão e sistematiza os processos de navegação que lhe oferecem suporte. A arquitetura é desenvolvida sobre os conceitos anteriormente expostos: inicialmente, a arquitetura e seu modelo de Tomada de Decisão são apresentados de forma global e, posteriormente, descrevem-se os componentes, das estruturas de dados e algoritmos de suporte.

3.1 DEFINIÇÃO DE VEÍCULO AUTÔNOMO DE TRANSPORTE TERRESTRE

Veículo Autônomo de Transporte Terrestre (abreviação simplificada VAT) é uma terminologia adotada pela EVA do PTR-EPUSP para definir qualquer tipo de veículo de transportes que possua um sistema computacional integrado que gerencie sua condução de forma a prescindir do condutor humano (PISSARDINI; WEI; FONSECA JUNIOR, 2013).

Um VAT possui as seguintes características essenciais:

- **O veículo deve realizar sua locomoção prioritariamente sobre a superfície terrestre:** o VAT deve ter a capacidade de navegação por longos períodos sobre a superfície terrestre, ainda que possa integrar recursos para navegar em outros meios (aquático ou aéreo).
- **O veículo deve possuir um sistema computacional que realize a condução autônoma:** o veículo deve possuir um sistema computacional para controlar a condução do veículo, permitindo prescindir da condução humana. O sistema pode ser integrado a um veículo não-autônomo ou ser parte nativa de um veículo autônomo original.

- **O veículo deve servir para transporte de seres humanos, bens ou ambos:** VATs não englobam robôs móveis não-tripulados militares, exploratórios ou construídos para outros fins que não atendam às necessidades de transporte da sociedade civil (tais como transporte pessoal, transporte público e transporte de carga). Por estas características, um VAT deve atender a níveis conservadores de segurança e confiabilidade em seu processo de navegação, de modo a manter a integridade de sua estrutura, dos seus usuários e do ambiente de navegação.
- **O veículo deve possuir capacidade de navegação em ambientes urbanos dinâmicos não - controlados e de larga escala:** o veículo deve ser capaz de navegar e interagir de forma autônoma com ambientes dinâmicos não-controlados (i.e., com comportamento variável não-previsível dos seus elementos) e de larga escala (com o tamanho mínimo de uma cidade), mesmo que haja possibilidade de restrição de suas operações para ambientes controlados.
- **O veículo deve ser aderente ao sistema de transporte e à legislação de trânsito:** o veículo deve interagir adequadamente com outros veículos e com outros componentes do sistema de transportes. As ações efetuadas pelo VAT devem estar padronizadas e em conformidade com a legislação de trânsito vigente no seu ambiente de navegação.

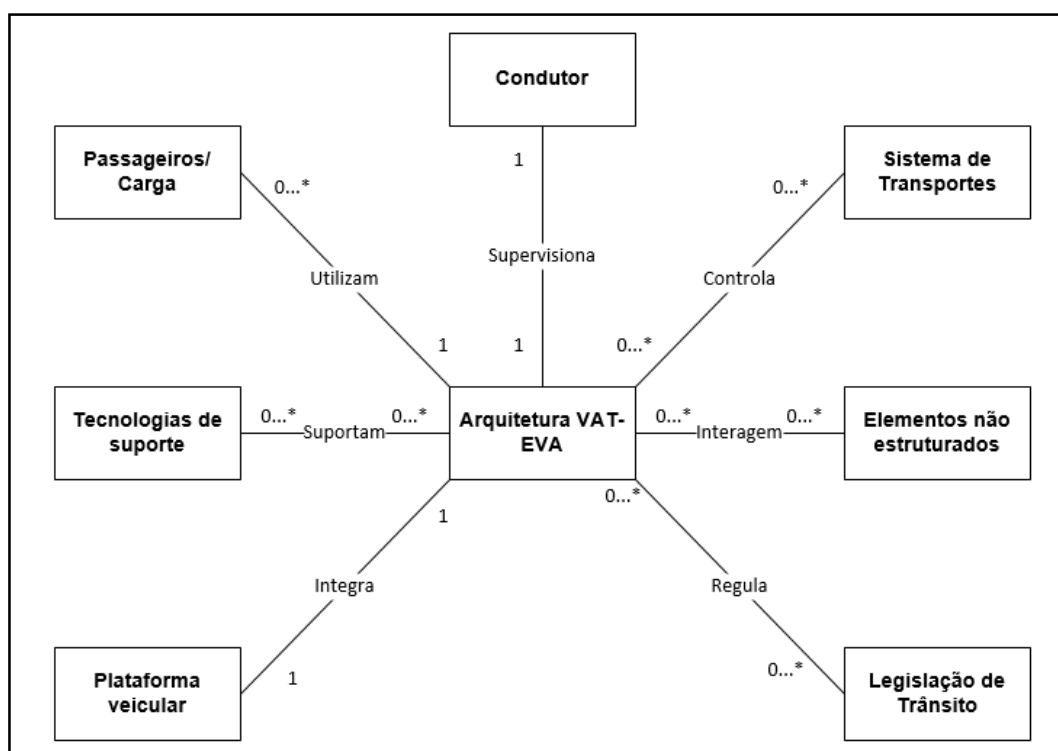
3.2 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA VAT-EVA

Arquitetura VAT-EVA é o nome que descreve a arquitetura-base de navegação autônoma que atende aos modelos de veículos robóticos implementados no PTR-EPUSP. A arquitetura organiza como os componentes e fluxos de processamento de um VAT devem ser integrados, permitindo a criação de diferentes modelos de veículo, independentemente do seu formato e tecnologia.

3.2.1 Descrição do ambiente da arquitetura VAT-EVA

A arquitetura VAT-EVA não funciona de forma isolada, mas interage com um conjunto de elementos que forma o ambiente externo à arquitetura. Estes elementos são segmentados em sete grupos: (a) condutor, (b) usuários/carga, (c) plataforma veicular, (d) tecnologias de suporte, (e) elementos do sistema de transportes, (f) legislação e (g) elementos não-estruturados. A relação dos elementos do ambiente externo com a arquitetura VAT-EVA é apresentada na Figura 11, onde a arquitetura é o componente central com o qual todos os elementos se associam.

Figura 11: Relação da arquitetura VAT-EVA com os elementos do ambiente externo



Fonte: O Autor.

As características de cada elemento do ambiente externo são:

- **Condutor:** designa o ser humano responsável pela condução do veículo. Mesmo em navegações plenamente autônomas (i.e., na qual o veículo

toma e realiza decisões sem necessidade do condutor), o condutor ainda é responsável pelo gerenciamento e supervisão da conformidade das ações realizadas pelo veículo, assim como da intervenção nestas ações quando necessário.

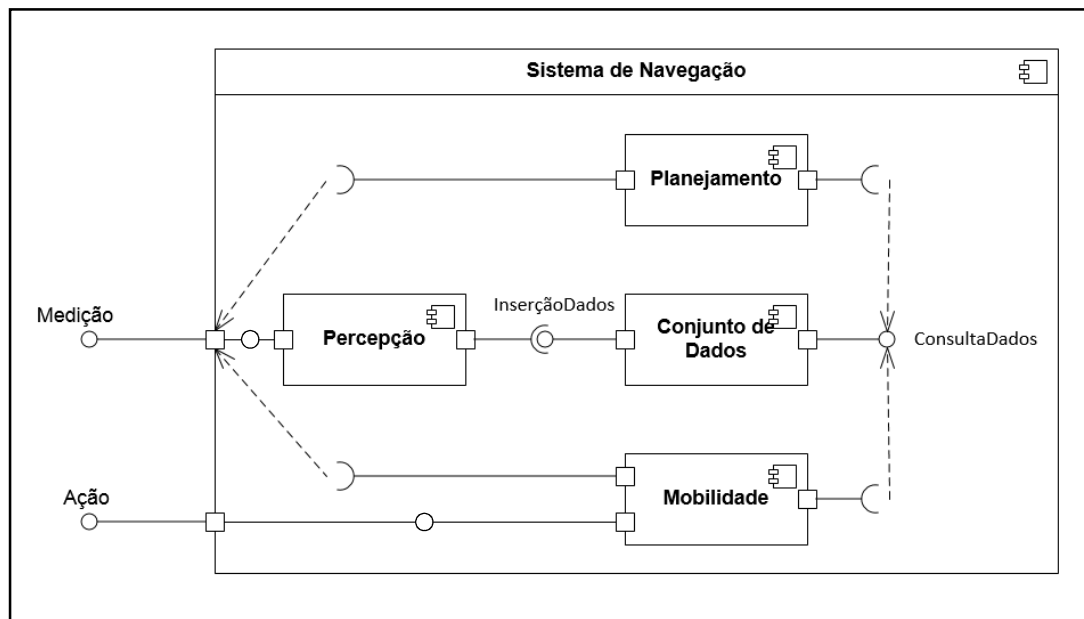
- **Passageiros/Carga:** designa os elementos transportados pelo veículo e que não gerenciam o processo de navegação.
- **Plataforma veicular:** designa o veículo ao qual a arquitetura está integrada.
- **Tecnologias de suporte:** tecnologias nativas ou de terceiros associadas à arquitetura VAT-EVA, mas que não são necessárias para a realização das atividades principais de navegação.
- **Elementos do sistema de transportes:** inclui qualquer elemento do ambiente que é organizado para atender a legislação de trânsito vigente e interagir de forma padronizada com o veículo em questão. Os principais elementos do sistema de transportes incluem outros veículos, sinalizações verticais e horizontais, agentes de trânsito, dados padronizados obtidos de centrais de trânsito, etc.
- **Elementos não-estruturados:** inclui qualquer elemento do ambiente que não está organizado para atender a legislação de trânsito vigente, que não interaja de forma padronizada com o veículo em questão ou que ofereça comportamento modelável. Os principais elementos não-estruturados incluem pessoas, animais, elementos naturais e artificiais, elementos do sistema de transportes quando não estão funcionais, tecnologias não-regulamentadas, etc.
- **Legislação:** inclui as regras de trânsito vigentes que o veículo deve cumprir durante a sua navegação. A legislação pode ser imposta à arquitetura pela inclusão de instruções *a priori* ou pela imposição da legislação pelos elementos da infraestrutura de transportes durante a navegação do VAT.

A arquitetura VAT-EVA é a estrutura central do ambiente de navegação, sendo composta de um agrupamento de sensores, atuadores e dispositivo de controle

organizados e integrados aos sistemas que compõem a estrutura de uma plataforma veicular no sentido de gerenciá-los.

A organização da arquitetura VAT-EVA é apresentada na Figura 12 e atende a estrutura básica de um robô móvel conforme apresentada no Capítulo 2.

Figura 12: Diagrama de componentes da arquitetura VAT-EVA



Fonte: O Autor.

Na arquitetura VAT-EVA, os elementos do ambiente são monitorados exclusivamente pelos sensores (mesmo ações realizadas pelo condutor), cujos sistemas realizam processamento local e extraem medições do ambiente conforme sua conveniência. A arquitetura é organizada de forma a não necessitar de especificação de quais sensores deverão ser utilizados: qualquer sensor pode ser adicionado desde que seja capaz de converter suas medições em dados padronizados aceitos pelas interfaces de entrada do sistema de navegação. Estas interfaces classificam as medições através de suas características genéricas e as enviam para o Sistema de Percepção. O Sistema de Percepção é responsável por realizar as transformações necessárias sobre estas medições e armazená-las nos Conjuntos de Dados do sistema. O processo completo de aquisição, transformação e armazenamento dos dados é chamado de Ciclo de Percepção e ocorre de forma independente e concorrente aos outros processos de navegação do veículo.

Um segundo ciclo de processamento, chamado de Ciclo de Navegação, é realizado pela combinação de outros processos de navegação: este ciclo inicia-se com a inserção da missão por parte do condutor. A partir da missão inserida, o Ciclo de Navegação inicializa o Sistema de Planejamento que gera uma rota de navegação e as estratégias de movimento recomendadas para que o veículo atinja a missão proposta. A rota gerada e aprovada pelo condutor é disponibilizada ao Sistema de Mobilidade que a integra com os dados obtidos do sistema de Percepção para tomar a decisão de qual a melhor ação de movimento a ser executada no ambiente externo. A ação gerada é transmitida através de uma interface padronizada de saída à qual atuadores e seus sistemas específicos podem ser integrados para receber instruções e executá-las fisicamente sobre o ambiente de acordo com o seu contexto.

3.3 PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO DO VAT-EVA

3.3.1 Organização da Tomada de Decisão de navegação

Tomada de Decisão é o processo central da arquitetura VAT-EVA e tem como objetivo organizar os processos de navegação para gerar opções de ação para movimentação no ambiente, selecionando aquela mais segura e adequada em um determinado contexto do ambiente. A Tomada de Decisão é um processo cíclico o qual está integrado ao Sistema de Mobilidade.

3.3.2 Hierarquia de Níveis de Prioridades

Para estruturar a Tomada de Decisão e os processos relacionados, considera-se que um VAT deve possuir recursos computacionais para trabalhar com a quantidade de dados necessária para modelar o ambiente de navegação e tomar decisões em um tempo adequado, atendendo aos requisitos de confiabilidade e segurança, e com eficiência similar ou superior àquela que seria obtida pela condução humana. Dependendo dos modelos e das tecnologias utilizadas pelo veículo, a quantidade de dados a ser processada pode exigir elevado custo

computacional em termos de armazenamento e processamento. Para construção do processo de Tomada de Decisão, a arquitetura VAT-EVA restringe suas operações a uma quantidade mínima de dados necessária para não comprometer as operações do sistema e prioriza os dados convenientes para realização das suas ações em termos de segurança, eficiência e cumprimento da legislação de transportes.

A arquitetura VAT-EVA organiza todos os dados do sistema em classes hierarquizadas de um sistema único de prioridades que busca simular e padronizar computacionalmente as exigências de comportamento às quais um condutor humano é submetido (Quadro 4).

Quadro 4: Hierarquia de prioridade associada aos dados do VAT-EVA

Nível	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 do sistema de navegação.
1	Planejamento	Prioridade padrão. Dados que sejam baseados em planejamento (por exemplo, planejamento de rota) e dados que expressam uma expectativa preliminar de alguma variável do ambiente a ser navegado (incluindo-se dados de odometria ou de inferência por parte do veículo).
2	Controle humano	Prioridade associada aos dados inseridos pelo condutor no controle de um veículo, incluindo ações de intervenção e de navegação (em cenários não autônomos). Considera-se o controle humano como o nível mais básico de controle reativo do veículo. Para veículos especiais (emergência, policiamento, governamentais e outros) este deve ser o maior nível de prioridade, pois necessitam realizar ações específicas e não modeláveis que não podem ser tratadas adequadamente por um carro robótico.
3	Comunicação Inter Veículos (V2V)	Prioridade associada aos dados, processamento e ações enviados ou originados da comunicação entre veículos em um ambiente, também incluindo sinalizações realizadas por veículos que não são VATs.
4	Infraestrutura de Transportes Primária (não regulamentada)	Prioridade associada aos dados, processamentos e ações relacionados aos componentes e tecnologias externas ao veículo, mas que não estão submetidas e padronizadas à

	legislação de transportes vigente (por exemplo, medições GPS obtidas sem a filtragem dos sistemas de transportes).
5 Infraestrutura de Transportes Secundária (estática)	Prioridade dos dados, processamentos e ações para elementos estáticos do sistema de transportes, i.e., cuja informação não varia através do tempo. Inclui dados fornecidos por sinais, placas e outros que pertençam ao sistema oficial de trânsito.
6 Infraestrutura de Transportes Terciária (Dinâmica)	Prioridade dos dados, processamentos e ações para elementos dinâmicos, ou seja, cuja informação pode variar através do tempo. Inclui dados fornecidos por sinais, placas, dispositivos de agentes de trânsito e outros que pertençam ao sistema oficial de trânsito.
7 Restrição (colisão e perda de integridade do veículo)	Nível de maior prioridade, é associado aos dados vinculados à possibilidade de colisão (ocupação de espaço ao mesmo tempo que outro elemento do ambiente ou espaço que não pode ser ocupado pelo veículo por qualquer motivo- por exemplo, por limitações da superfície de navegação), quando não ocorre o tratamento adequado por parte de outros níveis de prioridade.

Fonte: O Autor.

Imediatamente após a aquisição e detecção de um determinado dado pelo sistema, vinculam-se, obrigatoriamente, um nível de prioridade adequado e uma marca temporal (data e horário). A prioridade de um dado é determinada pela sua origem e em como será utilizado pelo sistema. Um dado específico é associado a um determinado nível de prioridade apenas se não puder ser tratado integralmente por um nível de prioridade inferior. Por padrão, a marca temporal é a data e horário de quando o dado foi obtido, no entanto, para dados obtidos que somente podem ser utilizados em um período de tempo futuro, a marca temporal é associada para quando o dado pode ser utilizado pelo sistema.

Para qualquer operação executada pelos processos do VAT, exceto em situações específicas, ao adquirir e processar dados, considera-se que se dois (ou mais dados) são adquiridos para uma mesma operação (com prioridades iguais ou diferentes) e não são mutuamente excludentes, opta-se pela conjunção simples dos dados para qualquer operação. Quando dois (ou mais) dados são obtidos para uma mesma operação e são mutuamente excludentes, em parte ou integralmente, opta-se pelo dado mais recente (baseando-se na marca temporal). Mas se estes dados possuem a mesma marca temporal, opta-se pelo

dado com maior prioridade. Ainda assim, se os dados possuem o mesmo valor de marca temporal e a mesma prioridade, considera-se os dados mais restritivos (i.e., com menor alteração de estado) em termos de segurança e confiabilidade conforme o contexto específico. Em qualquer evento, ao optar-se por um determinado dado, aquele que não foi escolhido é descartado (exceto o nível 0 que é descartado apenas quando não há condições de execução).

A hierarquia de prioridades permite, conforme a conveniência de desenvolvimento, que diferentes tipos de veículos (não apenas VATs) possam ser construídos, apenas habilitando ou desabilitando os níveis de dados que podem ser tratados pelo sistema de navegação conforme a conveniência (Quadro 5).

Quadro 5: Tipos de prioridades permitidas e restritas conforme o tipo de veículo

Tipo de Veículo	Prioridades permitidas e restritas
Veículos não-autônomos	Permitem-se apenas dados com prioridade 2, sendo desabilitados outros níveis.
Veículos com rotas pré-definidas	Permite-se apenas dados com prioridade 1, sendo desabilitados outros níveis.
Veículos controlados exclusivamente pela infraestrutura ⁶	Permitem-se apenas dados com prioridades entre 4 e 7.
Veículos reativos sem infraestrutura	Permitem-se apenas dados com prioridade 7, sendo desabilitados outros níveis.

Fonte: O Autor.

3.3.3 Grade de Prioridades e o Processo de Tomada de Decisão

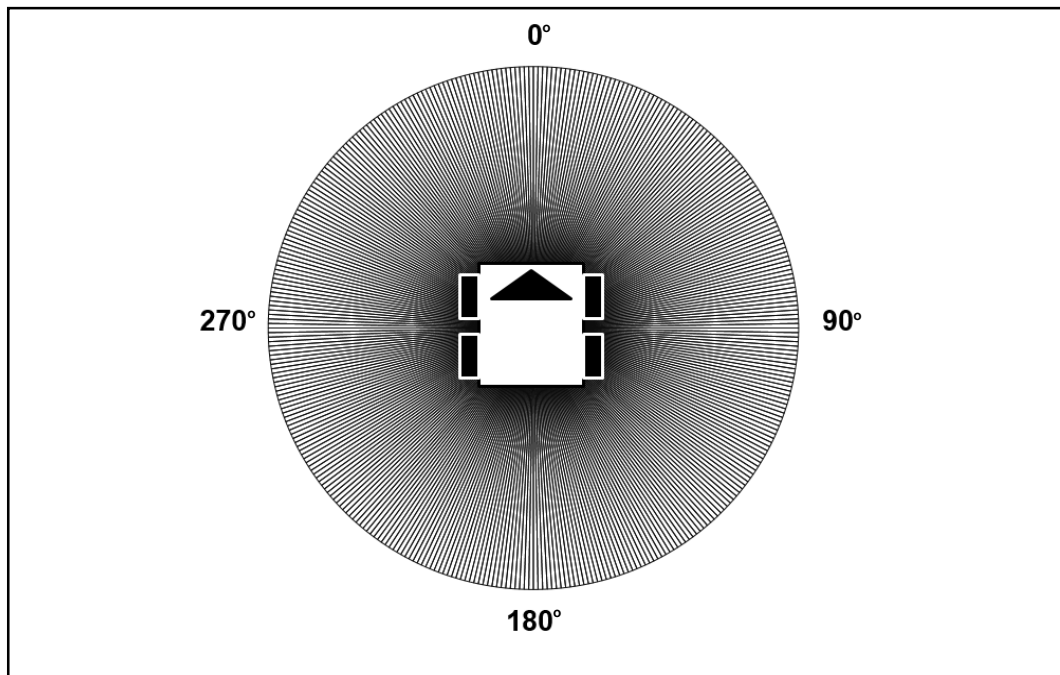
3.3.3.1 Estrutura da Grade de Prioridades

Grade de Prioridades (Figura 13) é a estrutura de dados central utilizada para Tomada de Decisão na arquitetura VAT-EVA. Seu objetivo é modelar a situação de trânsito presente, na qual o veículo está, através da integração de dados e algoritmos apropriados, permitindo que o veículo determine a ação de

⁶ Por exemplo, veículos guiados magneticamente, veículos guiados por marcas no solo, etc.

movimento apropriada para realizar a transição da atual situação de trânsito para outra mais apropriada para sua necessidade de navegação. A Grade de Prioridades é uma estrutura de dados baseada livremente sobre a estrutura proposta pelo algoritmo *Tangent Bug* (KAMON; RIMON; RIVLIN, 1998; CHOSET *et al.*, 2005).

Figura 13: Grade de Prioridades com abertura de 1°



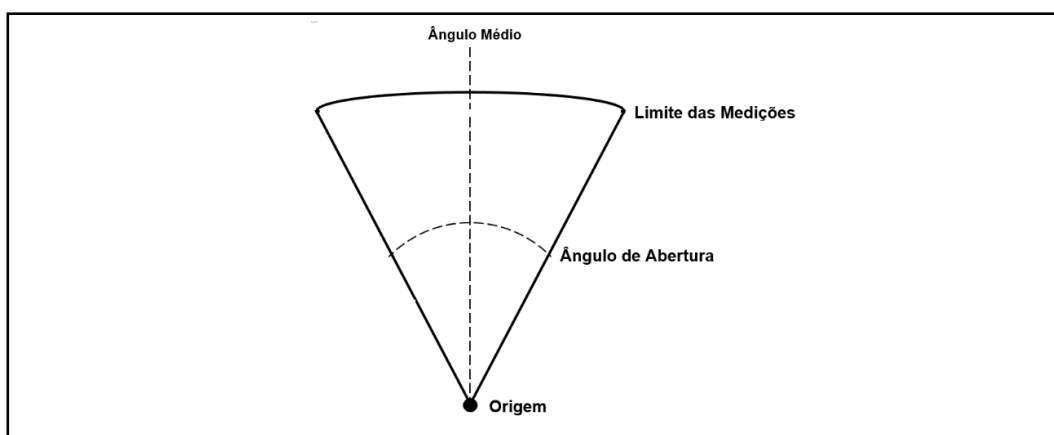
Fonte: O Autor.

A Grade de Prioridades representa as regiões (horizontais e verticais) adjacentes ao veículo em um modelo bidimensional, cuja finalidade é estabelecer qual região adjacente ao veículo possui maior espaço livre para navegação. As restrições e liberações das regiões da Grade são realizadas através da integração de dados de sensoriamento e planejamento do veículo.

A Grade da Prioridades é gerada como um círculo: sua origem é o centro geométrico do veículo e o valor de raio r é calculado como o maior valor de comprimento (em metros) de alcance de medição de todos os sensores de colisão integrados no sistema. Com estes parâmetros iniciais, calcula-se também o valor do diâmetro ($\varnothing = 2r$) e do comprimento ($c = 2\pi r$) da Grade de Prioridades.

A Grade gerada é segmentada em conjunto de setores circulares com igual valor de ângulo de abertura. Os setores originam-se no centro do veículo e terminam no limite do círculo. Cada setor única possui um índice único, que corresponde ao seu ângulo médio: os índices são padronizados de forma que o ângulo imediatamente à frente do veículo é considerado sempre como o ângulo médio 0° (zero), correspondendo ao índice da primeira região da grade e os ângulos progridem em sentido horário (Figura 14).

Figura 14: Setor circular da Grade de Prioridade e suas componentes



Fonte: O Autor.

A escolha sobre qual ângulo de abertura deverá ser adotado para os setores circulares define o nível de densidade da Grade. Quanto maior o ângulo de abertura escolhido, menores serão a densidade da Grade e o custo computacional envolvido para armazenamento e processamento, no entanto, grandes setores do espaço podem ser bloqueados por elementos mínimos associados à sua área, perdendo acurácia na descrição do ambiente. Quanto menor o ângulo de abertura, maiores serão o adensamento e o custo computacional envolvido, mas também é maior o detalhamento obtido do ambiente. O VAT-EVA estabelece, por padrão, o ângulo de abertura de cada setor circular em 1° (gerando uma Grade de Prioridades de 360 posições), com o intuito de gerenciar de forma mais precisa toda a região adjacente ao veículo e facilitar a conversão de dados obtidos de sensores com diferentes valores de ângulos de abertura com baixa perda de precisão. Desta forma, no modelo

padrão de 360 posições, a largura máxima de um setor circular possui o tamanho igual a $c/360$, onde c é o comprimento do círculo.

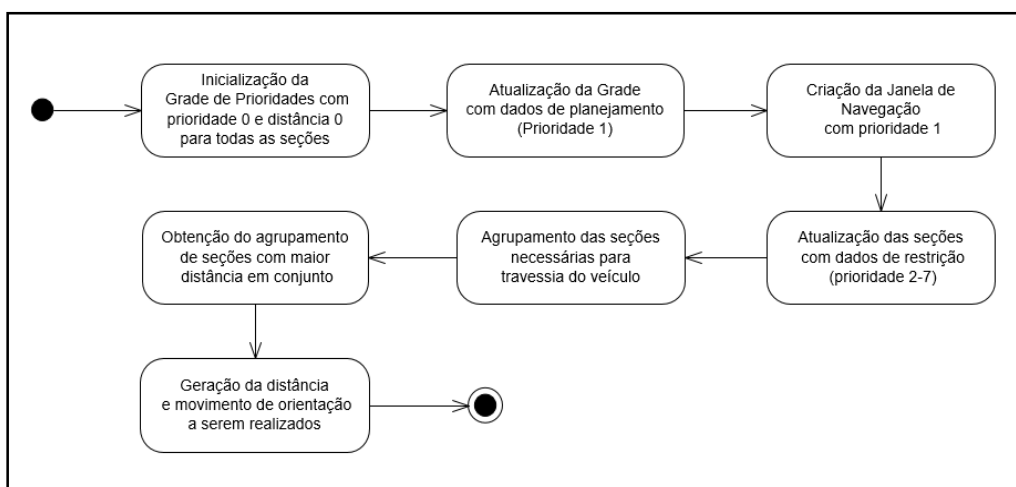
Cada setor circular é descrito por $s_i = (d, p, tempo)$, onde para um setor s com índice i (sendo $\{i \in \mathbb{R} \mid 0 \leq i < i_{max} + 1\}$), armazenam-se três valores específicos:

- a distância livre $[d]$ que o veículo pode navegar para a região daquele setor (sendo um valor entre $0,00\text{ m}$ e o maior valor de comprimento de alcance de medição de todos os sensores de colisão integrados no sistema – com uma precisão de duas casas decimais);
- o nível de prioridade $[p]$ da última medição que atualizou o setor circular em questão;
- a marca temporal $[tempo]$ da última atualização da seção em questão.

3.3.3.2 Uso da Grade de Prioridade para Tomada de Decisão

A utilização da Grade de Prioridades para Tomada de Decisão é apresentada de forma simplificada na Figura 15 e de forma mais detalhada no Apêndice C.3.4.

Figura 15: Etapas simplificadas da criação da Grade de Prioridades

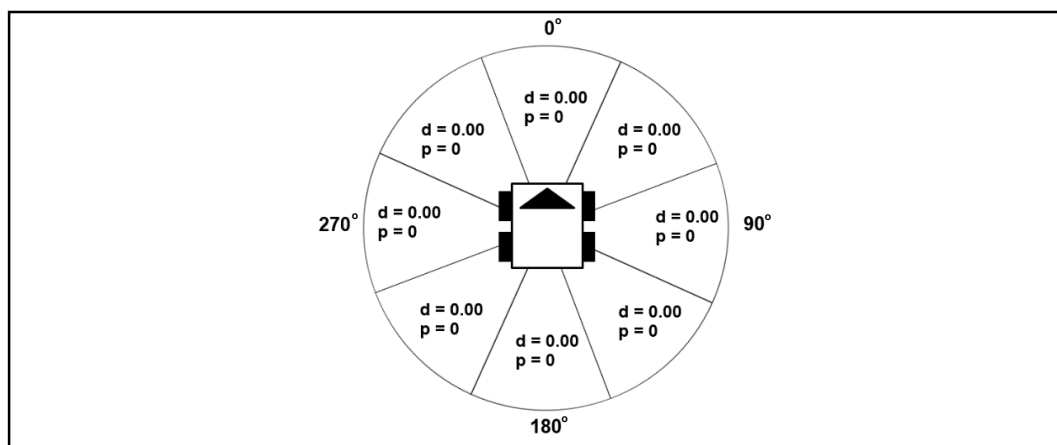


Fonte: O Autor.

A implementação computacional da Grade de Prioridade pode ser realizada através de diferentes estruturas de dados como matrizes computacionais, listas e outros formatos, conforme a conveniência do desenvolvimento.

A primeira etapa da construção da Grade de Prioridades (Estado de Segurança) consiste em construir sua estrutura. A Grade é dividida em setores circulares com valores iniciais de distância que não permitam ao veículo mover-se (Figura 16). Estes valores são, por padrão, $d = 0,00\text{ m}$, $p = 0$ e *tempo* igual ao momento de construção, para todas os setores da Grade. Considera-se que, se há ao menos uma seção da grade com $d \neq 0,00\text{ m}$, o veículo poderá movimentar-se. O Estado de Segurança é sempre assumido no início de cada ciclo de Tomada de Decisão e nas situações nas quais o veículo deva permanecer parado.

Figura 16: Exemplo de Grade de Prioridades com abertura de 45 graus⁷ com valores iniciais



Fonte: O Autor.

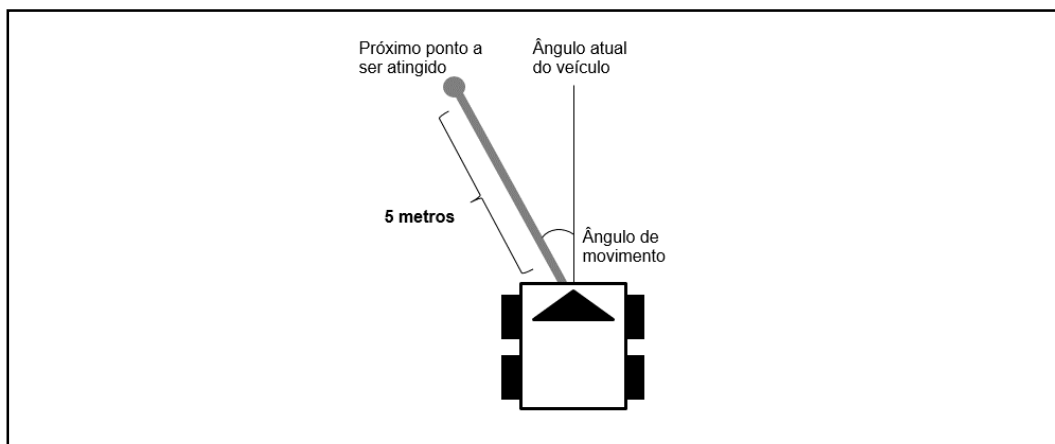
A segunda etapa da construção da Grade de Prioridades tem como objetivo determinar as regiões adjacentes ao veículo que estão vinculadas à rota planejada. O processo, inicialmente, envolve obter a distância e ângulo de orientação que permita ao veículo mover-se da sua posição atual para o próximo local do ambiente a ser atingido⁸ (Figura 17). Busca-se na Grade de Prioridades o setor circular associada ao ângulo de orientação obtido (Figura 18): esta região

⁷ A abertura de 45° é utilizada como exemplo para facilitar a visualização da Grade de Prioridades.

⁸ No caso de navegação híbrida, o próximo vértice da rota planejada. No caso de navegação reativa, a missão proposta. No caso de navegação controlada, a ação proposta pelo condutor.

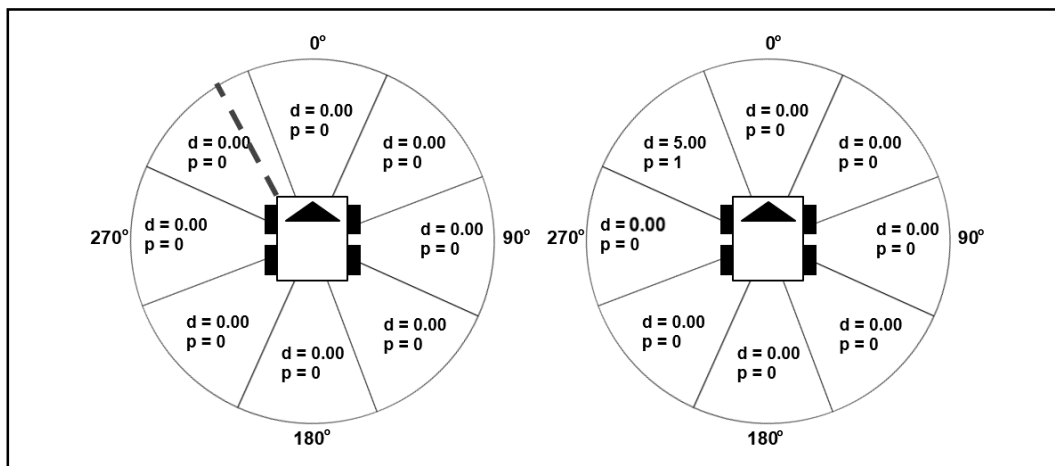
terá sua distância atualizada com o valor de distância calculada, sendo que prioridade assumirá o valor 1 (nos casos de navegação autônoma) ou prioridade 2 no caso de navegação controlada.

Figura 17: Distância e orientação da posição atual e próxima posição de navegação



Fonte: O Autor.

Figura 18: Grade de Prioridades com exemplo de dados de planejamento (linha tracejada)

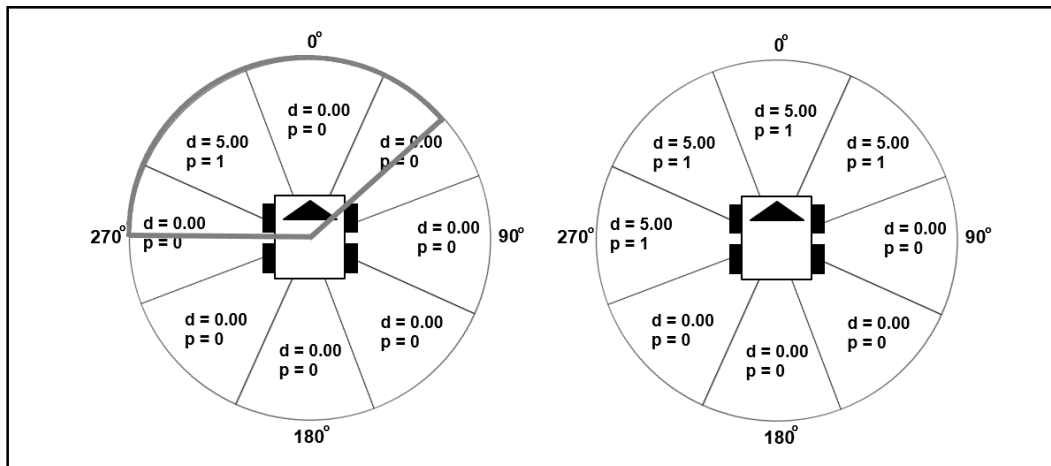


Fonte: O Autor.

A terceira etapa envolve a construção da Janela de Navegação para definir os setores que o veículo pode ocupar baseado no planejamento. O objetivo da Janela de Navegação é estabelecer um conjunto de opções de ação, no mesmo sentido de planejamento, que o veículo pode realizar caso não possa seguir diretamente pelo setor originalmente planejado. Estas regiões são obtidas pela conjunção 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 (Figura 19). Os setores compreendidos neste limite recebem o mesmo valor de d da região de planejamento e prioridade igual a 1.

Figura 19: Atualização da Grade de Prioridades com dados da Janela de Navegação



Fonte: O Autor.

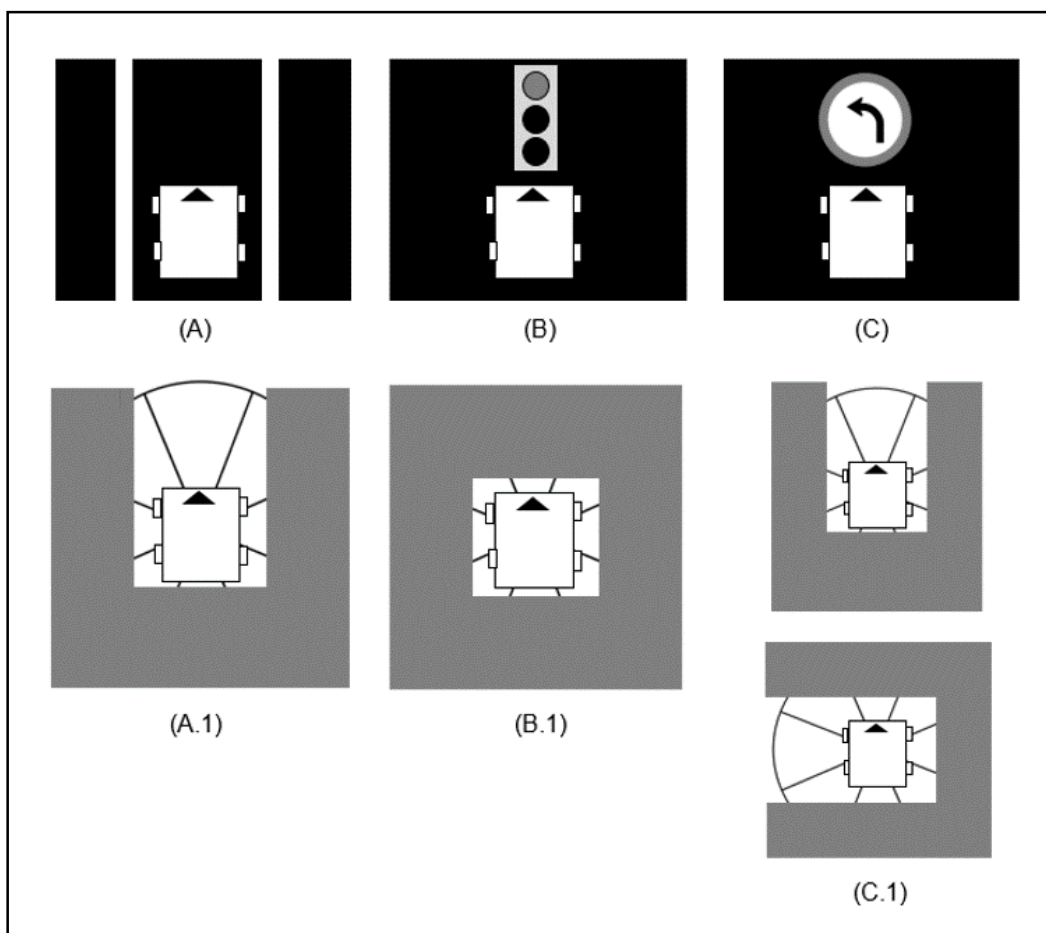
A quarta etapa da construção da Grade de Prioridades consiste em obter os comandos do condutor (velocidade e orientação da movimentação, se existentes, que são convertidos em distância e orientação para uso na Grade) e medições de restrição (de comunicação e de colisão) (prioridades 2 à 7), combinando-os com o objetivo de impor liberações e restrições do espaço e refinar a rota planejada pelo veículo. São utilizadas todas as medições com marca temporal igual ou inferior à data/hora atual do sistema.

Todas as medições são obtidas em função das distâncias e ângulos de orientação entre o veículo e os elementos de restrição. Para cada medição disponível, obtém-se o setor circular associado ao ângulo de orientação: quando a medição for mais atual do que aquela já disponível na Grade, o setor específico é atualizado com o valor de distância da medição, a prioridade vinculada e a data/hora atual. Se a medição possui a mesma marca temporal do setor em questão, verifica-se se a medição possui maior valor de restrição (i.e., aquela com valor de distância mais próximo de 0,00 m), realizando-se a atualização de prioridade e distância, caso a verificação seja positivo. Nos casos em que há a

mesma marca temporal, opta-se por atualizar apenas o valor de prioridade com o maior valor.

A utilização de medições de restrição no intervalo das Prioridades 2 a 6 (i.e., de controle humano à comunicação) permite que o veículo possa obedecer diferentes legislações de trânsito, sinalizações estáticas, sinalizações dinâmicas e comunicação com o sistema de transportes desde que os dados de comunicação e as medições dos sensores consigam mapear qualquer evento externo em combinações de restrição/liberação de distância e ângulo de orientação em relação ao veículo (Figura 20).

Figura 20: Exemplo de projeção de eventos do ambiente sobre a Grade de Prioridades

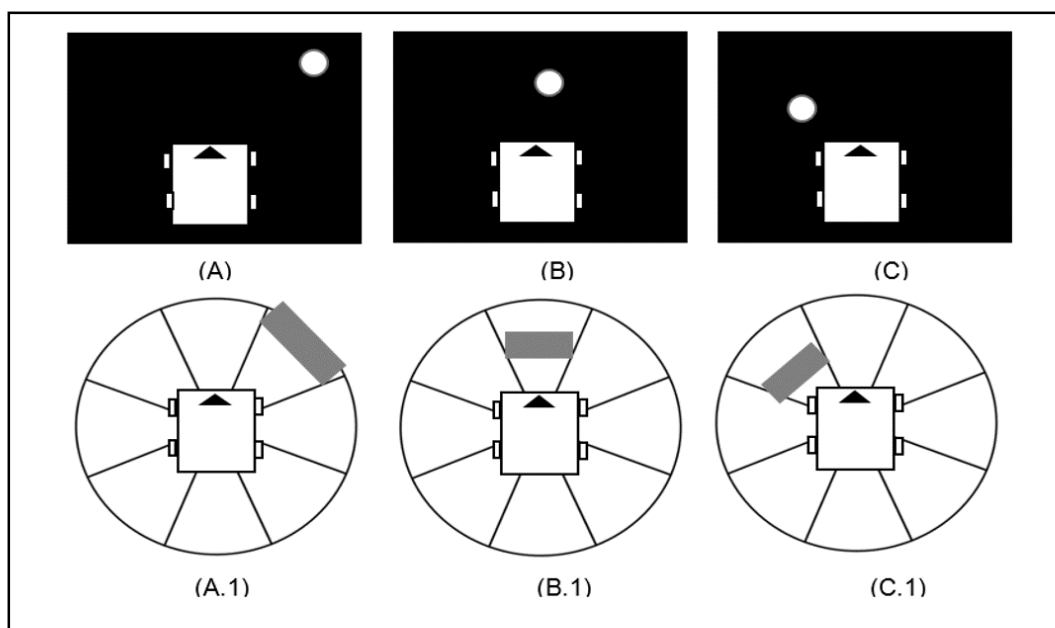


Fonte: O Autor.

Dados de colisão (i.e., medições de elementos que podem interferir na segurança da estrutura do VAT) (Prioridade 7) são medições obtidas dos elementos próximos que possam impedir a navegação do veículo para uma

determinada região do espaço e que não estejam vinculados ao sistema de transportes ou que não possam ser interpretados pelo veículo como tal⁹ (Figura 21). Os dados de colisão são obtidos em função da distância e ângulo de orientação em relação ao elemento de colisão e são consideradas na Grade apenas quando o elemento de colisão oferecer maior restrição do que outros elementos do ambiente considerados pela Grade.

Figura 21: Projeção de elementos de colisão sobre a Grade de Prioridades



Fonte: O Autor.

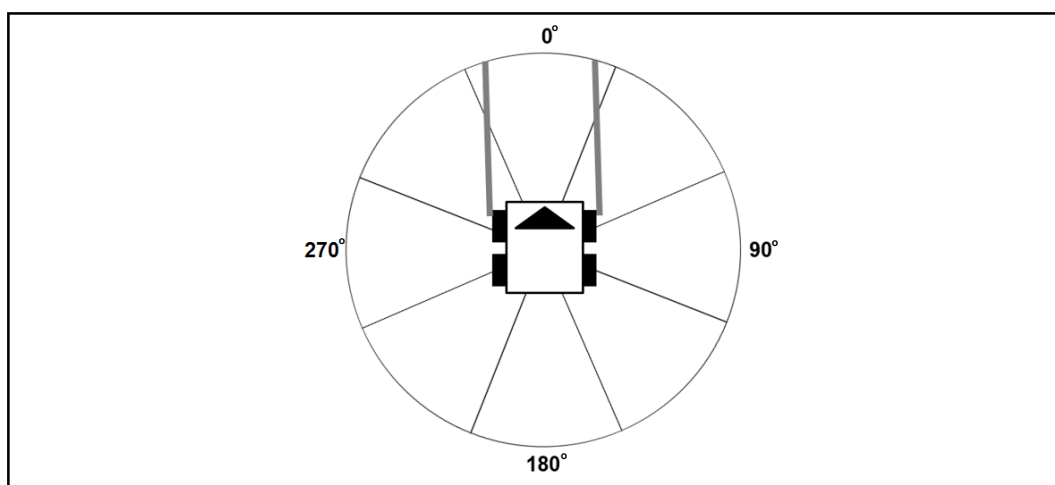
Após as etapas de aquisição de dados, a Grade de Prioridades terá integrado os dados de diversas fontes permitindo a realização da Tomada de Decisão em função de duas variáveis: distância a ser percorrida e orientação de movimento. Como a distância a ser percorrida possui uma restrição de tempo sobre a qual deverá ser trabalhada, ela é transformada na velocidade atual sobre a qual o veículo deverá realizar sua ação, sob a forma d/s , onde d é a distância a ser percorrida em 1 s (segundo).

Por padrão, o movimento do veículo deve ser orientado para o setor da Grade mais próxima à região do planejamento inicial e que possua o maior valor de

⁹ Por exemplo, dados obtidos por sensores de colisão que não permitem distinguir elementos do ambiente, como sensores ultrassônicos.

distância livre (com valor $d > 0,00 m$). Nos casos em que não há nenhum setor com $d > 0,00 m$ (o que configura o Estado de Segurança), o veículo deverá permanecer parado até o próximo ciclo de Tomada de Decisão. Se o veículo não está no Estado de Segurança, deve-se considerar que o VAT, independente do seu modelo, não consegue atravessar um único setor circular, exceto em casos de grades de baixíssima densidade (Figura 22).

Figura 22: Exemplo da Região de Agrupamento mínima necessária para travessia do veículo



Fonte: O Autor.

Por isto, na maior parte das implementações de Grades, é necessário determinar a quantidade mínima de setores necessários para a travessia do veículo. Esta quantidade de regiões é chamada de Região de Agrupamento, sendo calculada por:

$$RA = (\text{largura} + \text{distância de segurança lateral}^2) / \left(\frac{2\pi r}{n}\right) \quad (3.1)$$

Onde RA é a região de agrupamento, $[\text{largura}]$ é a largura máxima do veículo, $[\text{distância de segurança lateral}]$ é o valor de distância de segurança lateral que o veículo (ver Apêndice B.1) deve manter em relação aos elementos do ambiente, $[r]$ é o raio da Grade (obtido pelo maior valor de comprimento entre os sensores de colisão disponíveis) e $[n]$ é o número de setores circulares da Grade. O valor de RA deve ser arredondado para o próximo número inteiro superior.

Considerando-se todas as RA s que uma Grade pode gerar, calcula-se cada RA sob a forma:

$$RA_i = (d, \text{orientação}) \quad (3.2)$$

Na qual para um RA que inicia no setor circular com índice i , calcula-se $[d]$ como o menor valor de distância de todos os setores que compõem RA_i . O valor de $[\text{orientação}]$ é o valor de diferença entre o índice médio da RA e a posição 0 da Grade. Desta forma se estabelece:

- **Distância final para movimento:** é igual ao maior valor de $RA(d)$ entre todos os valores disponíveis. Se há duas ou mais $RA(d)$ com mesmo valor, obtém-se aquela mais próxima do planejamento inicial (i.e., com menor $RA(\text{orientação})$). Caso duas ou mais $RA(d)$ possuam ainda o mesmo valor de $RA(\text{orientação})$, escolhe-se aquela cuja orientação é semelhante à orientação do planejamento inicial.
- **Orientação final para movimento:** é igual ao valor de $RA(\text{orientação})$ associado à $RA(d)$ selecionada como distância final. A orientação final é o ângulo de movimento com o qual o veículo deve realizar para sua ação.

Os dois valores obtidos são, então, enviados ao Sistema de Mobilidade para entrega aos atuadores. Após a execução da ação por partes dos atuadores, a arquitetura deve verificar se o veículo atingiu a missão proposta. Caso esta condição não seja atendida e os recursos do veículo permitam, retorna-se à Etapa 1 da construção da Grade de Prioridades.

Um exemplo didático da criação da Grade de Prioridades e da Tomada de Decisão associada é apresentada no Apêndice A.

Uma questão importante a ser abordada para navegação é que, ainda que as operações sobre a Grade de Prioridades sejam descritas utilizando diretamente as medições disponíveis, recomenda-se o ajustamento destas distâncias para garantir a segurança da movimentação do veículo. O ajustamento é dado sob a forma:

$$d' = d - \text{distância de segurança frontal} \quad (3.3)$$

Onde $[d']$ é a distância ajustada, $[d]$ é a distância original e $[\text{distância de segurança frontal}]$ é a distância frontal a ser mantida em relação a

outros elementos no contexto de navegação. A distância de segurança varia se o veículo está em movimento (Distância Frontal de Segurança Dinâmica) ou iniciando um processo de parada (Distância Frontal de Segurança Estática). Os parâmetros de distância frontal nesta arquitetura são apresentados no Apêndice B.1.

3.4 FORMALIZAÇÃO DA ARQUITETURA VAT-EVA

Os conceitos envolvidos na construção da Grade de Prioridades e do modelo de Tomada de Decisão podem ser desenvolvidos sob diferentes formas e tecnologias. Esta seção apresenta uma proposta de processos e estruturas de dados que permitem suportar estes recursos e organizar um modelo de sistema de navegação baseado na Hierarquia de Níveis.

3.4.1 Padrões adotados

Um sistema de navegação de um VAT deve adotar um sistema de referência espacial padrão para modelar as coordenadas sobre o ambiente e permitir ao veículo realizar as diversas operações relacionadas à navegação (como cálculos de coordenadas, distâncias e ângulos), converter dados de recursos externos e possuir um formato padrão que permita a integração com outros elementos do ambiente externo. No modelo VAT-EVA utiliza-se o sistema WGS84 para esta padronização.

Para os cálculos de distâncias e orientações na maior parte das operações da arquitetura VAT-EVA utilizam-se coordenadas cartesianas relacionadas. Uma distância d entre duas coordenadas cartesianas é dada sob a forma:

$$d = \sqrt{(X_f - X_i)^2 + (Y_f - Y_i)^2} \quad (3.4)$$

Na qual, $[X_i, Y_i]$ são os valores da primeira coordenada e $[X_f, Y_f]$ são os valores da segunda coordenada que estejam em um mesmo sistema de referência para uma mesma época (caso não estejam, é necessária a transformação de

coordenadas). O ângulo de orientação θ entre as duas coordenadas é dada sob a forma:

$$\theta = \arctan((Y_f - Y_i)/(X_f - X_i)) \quad (3.5)$$

Para cálculos relacionados a grandes distâncias (i.e., para cálculo de planejamento de rota no Sistema de Planejamento), não despreza-se a forma da Terra. Desta forma, opta-se pela transformação das coordenadas cartesianas em coordenadas geodésicas e o cálculo de distâncias é realizado mediante a lei esférica dos cossenos (onde d é a distância, $[\varphi_i, \lambda_i]$ são os valores de latitude e longitude da primeira coordenada, $[\varphi_f, \lambda_f]$ os valores de latitude e longitude da segunda coordenada e a_e o valor do eixo equatorial do esferoide utilizado como referência):

$$d = \arccos(\sin\varphi_i \times \sin\varphi_f + \cos\varphi_i \times \cos\varphi_f \times \cos(\Delta\lambda)) \times a_e \quad (3.6)$$

O ângulo de orientação entre duas coordenadas é calculada sob a forma

$$\theta = \arctan(\sin(\Delta\lambda) \times \cos(\varphi_f) / \cos(\varphi_i) \times \sin(\varphi_f) - \sin(\varphi_i) \times \cos(\varphi_f) \times \cos(\Delta\lambda)) \quad (3.7)$$

Todas as medições da arquitetura VAT-EVA são padronizadas pelo Sistema Internacional de Pesos e Medidas. Desta forma adota-se o metro (m) para dados de distância, o segundo (s) para dados de tempo, metros/segundo (m/s) para dados de velocidade e quilogramas (kg) para dados de massa (BIPM, 2006).

3.4.2 Conjuntos de Dados

Para gerenciar os dados necessários à arquitetura, o VAT-EVA organiza cinco conjuntos de dados (*CD*) internos: Sistemas de Referência (*SR*), Modelo do Veículo (*MV*), Estado do Veículo (*EV*), Modelo do Ambiente (*MA*) e Modelo de Navegação (*MN*). Desta forma, os *CD* são descritos sob a forma:

$$CD = (SR, MV, EV, MA, MN) \quad (3.8)$$

3.4.2.1 Sistemas de Referência (SR)

Sistemas de Referência (SR) são os conjuntos de dados que armazenam informações sobre o sistema de referência espacial padrão utilizado para estabelecer o sistema de coordenadas para os processos envolvidos na navegação do veículo. Além do sistema de referência padrão, SR armazenam dados de outros sistema de referência e os parâmetros de transformação para o sistema padrão do veículo e vice-versa. Pela sua natureza estática, SR podem ser disponibilizados ao veículo em um formato de arquivo, banco de dados ou como valores constantes, inseridos preliminarmente no sistema de navegação.

O conjunto SR é representado sob a forma:

$$SR = (sr_0, sr_1, \dots, sr_{max}) \quad (3.9)$$

Onde sr_i é um sistema de referência específico cujos dados estão armazenados no veículo e que se apresenta como:

$$sr_i = \{\text{identificador, nome, época, } a_e, b_e, f_e, T_{sr_i}\} \quad (3.10)$$

Na qual [identificador] representa um valor único (de acordo com a conveniência do desenvolvedor¹⁰) que diferencia o sistema de referência de outros disponíveis, [nome] é uma nomenclatura amigável para uso por seres humanos, [época] refere-se à quando foi realizado o sistema de referência, [a_e] e [b_e] são os semieixos maior e menor (respectivamente) do esferoide associado, [f] é o achatamento do esferoide e [T_{sr_i}] é o conjunto de parâmetros de transformação do sistema em questão para aquele de referência do veículo (no caso da arquitetura VAT-EVA, o WGS84). Os valores T_{sr_i} são dados sob a forma:

$$T_{sr_i} = \{C_x, C_y, C_z, s, r_x, r_y, r_z\} \quad (3.11)$$

Onde [C_x, C_y, C_z] compõem o vetor de translação para as coordenadas [X, Y, Z] (em metros), s é o fator de escala (em partes por milhão) e [r_x, r_y, r_z] compõem os eixos de rotação (em radianos). Estes parâmetros devem ser adquiridos

¹⁰ Uma sugestão de padronização de identificadores é a adoção do modelo da *EPSG Geodetic Parameter Registry* (<http://www.epsg-registry.org/>).

preliminarmente de uma base de dados de parâmetros já existente. As transformações são, então, realizadas utilizando a Transformação de Helmert (MONICO, 2007; ESPG, 2013):

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_X \\ C_Y \\ C_Z \end{bmatrix} + (1 + s) \times \begin{bmatrix} 1 & -r_Z & r_Y \\ r_Z & 1 & -r_X \\ -r_Y & r_X & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Onde $[X, Y, Z]$ são as coordenadas originais a serem transformadas de acordo com um sistema de referência específico e $[\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}]$ são as coordenadas finais no sistema de referência padrão do veículo obtidas pela transformação

3.4.2.2 Modelo do Veículo (MV)

O Modelo do Veículo (MV) é o conjunto de dados que descreve as características físicas e lógicas do veículo que possam impactar em um processo específico de navegação, fornecendo os parâmetros necessários para comparação com as medições dos sensores para determinar se uma região do espaço é navegável ou não. Os dados do MV são normalmente definidos no projeto original do veículo, sendo estáticos e inalteráveis no espaço-tempo. Por estes motivos, os dados do Modelo do Veículo não necessitam ser associados a valores de prioridade ou marcações de tempo (pois não são atualizados), e sua implementação pode ser realizada mediante a adoção de um conjunto de dados constantes no sistema.

O Modelo do Veículo é representado pelo conjunto:

$$MV = (mv_0, mv_1, \dots, mv_{max}) \quad (3.13)$$

Onde mv_i é um atributo específico do Modelo do Veículo sob a forma:

$$mv_i = \{\text{atributo}, \text{valor}\} \quad (3.14)$$

Na qual para um atributo i do modelo de veículo, define-se um [atributo] que é o nome da característica do veículo que será definida e um [valor] (numérico, textual ou lógico) associado ao atributo. A definição de quais características deverão ser adotadas é dependente do tipo de VAT a ser desenvolvido, porém

a recomendação é que sejam adotadas todas as características do veículo físicas ou lógicas que impactem no processo de navegação mas que sejam imutáveis no espaço e no tempo.

O Apêndice B.1 apresenta os principais atributos utilizados no modelo VAT-EVA.

3.4.2.3 Estado do Veículo (*EV*)

O Estado do Veículo (*EV*) é um conjunto de dados que expressa o comportamento mais atual do veículo em relação ao ambiente. No caso do modelo VAT-EVA, o *EV* baseia-se no modelo do biciclo e por se tratar de um conjunto de dados que necessita de constante atualização, recomenda-se sua implementação na forma de um conjunto de dados variáveis que, no entanto, não precisam de armazenamento permanente para longo prazo.

O Estado do Veículo é representado sob a forma:

$$EV = (ev_0, ev_1, \dots, ev_{max}) \quad (3.15)$$

Onde ev_i é um atributo do estado do veículo sob o formato:

$$ev_i = \{\text{atributo, valor, prioridade, tempo}\} \quad (3.16)$$

No qual, para uma determinada característica i associa-se um [atributo] que define uma característica do estado do veículo, o [valor] mais atual associado ao atributo, um nível de [prioridade] de acordo com a hierarquia de níveis proposta neste trabalho e o [tempo] que determina a data/hora quando foi obtida o último valor associado ao atributo. A definição de quais características devem ser adotadas é dependente das necessidades de desenvolvimento, considerando-se adequados todos os elementos do veículo que possam alterar seu comportamento no tempo e no espaço.

O Apêndice B.2 apresenta os principais atributos utilizados na arquitetura VAT-EVA.

3.4.2.4 Modelo do Ambiente (*MA*)

O Modelo do Ambiente (*MA*) combina diversos conjuntos de dados para descrever o estado mais atual do ambiente externo ao veículo (i.e., a configuração dos elementos do ambiente em relação ao veículo). Este modelo necessita de atualização constante, recomendando-se sua implementação na forma de um conjunto de variáveis de sistema que, no entanto, não precisam de gravação para longo prazo, exceto se o veículo adotar o processo de mapeamento.

O Modelo do Ambiente é representado por:

$$MA = (E, G, Q, P, C) \quad (3.17)$$

Na qual integram-se as Características do Ambiente (*E*), uma Grade de Prioridades (*G*) e três listas dinâmicas que alimentam as duas estruturas anteriores: uma lista de medições de Restrição de espaço (*Q*), uma lista de medições de Posicionamento (*P*) e uma lista de medições de Comunicação (*C*).

As características do ambiente (*E*) descrevem atributos do ambiente que não envolvem restrições/liberações de espaço no ambiente, mas que descrevem procedimentos de comportamento do veículo no ambiente. Sua forma é:

$$E = (e_0, e_1, \dots, e_{max}) \quad (3.18)$$

Onde um atributo de característica do ambiente é representado por:

$$e_i = \{\text{atributo, valor, prioridade, tempo}\} \quad (3.19)$$

Sendo que, para uma característica *i*, armazena-se o [atributo] do ambiente, o seu [valor] associado, a [prioridade] de acordo com a hierarquia de níveis e o marcador de [tempo] da obtenção da característica. No modelo VAT-EVA, utilizam-se como padrão as variáveis expostas no Apêndice B.3.

A Grade de Prioridades (*G*) é uma grade que mapeia o ambiente de navegação do veículo segmentando-o em um conjunto de posições de acordo com um ângulo de abertura pré-determinado conforme descrito na seção 3.3. A Grade de Prioridades possui a forma:

$$G = (s_0, s_1, \dots, s_{max}) \quad (3.20)$$

Onde s_i é um setor circular da Grade de Prioridades sob a forma:

$$s_i = (\text{índice}, \text{distância}, \text{prioridade}, \text{tempo}) \quad (3.21)$$

Na qual [índice] representa o ângulo médio do setor (sendo o índice maior ou igual a 0 e menor do que 360). O valor de s_0 (índice) deve ser igual a 0 e para todo s_i (índice) com $i > 0$, o valor do índice será igual a s_i (índice) = $i \times$ ângulo de abertura convencionado. O valor de [distância] representa o comprimento livre (em metros) entre o veículo e o elemento de colisão mais próximo na abrangência do setor em questão, [prioridade] é o nível associado à medição de ocupação conforme a hierarquia de prioridades e [tempo] é a marca temporal da última atualização do setor. Os valores de distância e prioridade são atualizados pelo processo de Tomada de Decisão.

As listas dinâmicas de restrições de espaço (Q), de posicionamentos (P) e de comunicação (C) são listas de dados geradas a partir das medições dos grupos de sensores associados a cada lista. Os modelos de medições armazenadas em cada lista são apresentados na seção 3.5.1.

3.4.2.5 Modelo de navegação (MN)

Modelo de Navegação (MN) abrange aos conjuntos de dados que sistematizam os parâmetros que orientam a navegação do veículo. Estes dados são adquiridos no início do processo de navegação, sendo mantidos pelo sistema até a finalização da missão.

Os dados de navegação no VAT-EVA são representados sob a forma:

$$MN = (m, p_{inicial}, R_m^{p_{inicial}}, DR) \quad (3.22)$$

Na qual os dados de navegação MN são compostos por uma missão [m], posição inicial do veículo [$p_{inicial}$], uma rota [$R_m^{p_{inicial}}$] que conecte [$p_{inicial}$] à [m] e [DR] é um conjunto de rotas (no mesmo formato de $R_m^{p_{inicial}}$) armazenados no

sistema. As componentes $[m, p_{inicial}, R_m^{p_{inicial}}]$ são reinicializadas a cada processo de navegação, pelo que se recomenda sua gravação no sistema até o final da navegação. Já $[DR]$, como acumula as rotas utilizadas pelo veículo, recomenda-se sua gravação em um sistema de gerenciamento de bancos de dados.

A missão $[m]$ e o posicionamento inicial $[p_{inicial}]$ são modelados através do modelo de estado do veículo que, por simplificação, pode ser dada em apenas duas coordenadas cartesianas $[X, Y]$ dentro do sistema de referência padrão e da época do veículo:

$$\begin{aligned} p_{inicial} &= [X, Y] \\ m &= [X, Y] \end{aligned} \quad (3.23)$$

Uma rota $[R_m^{p_{inicial}}]$ é gerada ou obtida externamente pelo processo de planejamento, através de um conjunto de arestas e vértices que interligue $[p_{inicial}]$ e m , na forma:

$$R_m^{p_{inicial}} = (r_0, r_1, \dots, r_{max-1}, r_{max}) \quad (3.24)$$

Onde r_i é uma configuração da rota sob a forma:

$$r_i = (X_i, Y_i, X_{i+1}, Y_{i+1}, \text{tipo}, \text{velocidade}, \text{tempo}) \quad (3.25)$$

Na qual as coordenadas $[X_i, Y_i]$ e $[X_{i+1}, Y_{i+1}]$ são, respectivamente, os vértices iniciais e finais no sistema de referência padrão do veículo, entre os quais se estabelece um caminho livre para navegação em linha reta (aresta) e $[X_{i+1}, Y_{i+1}]$ é a posição na qual o veículo deve alterar sua orientação de navegação. A variável $[\text{tipo}]$ em define o tipo de via ao qual está associada a coordenada, o que permite restringir os tipos de ações de navegação que podem ser realizadas na via e estabelecer a $[\text{velocidade}]$ máxima que pode ser executada na via por padrão. Os tipos de vias aceitos no modelo VAT-EVA, de acordo com os artigos 60 e 61 do Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997) são representadas pelo Quadro 6. A variável $[\text{tempo}]$ determina a marcação temporal para quando foi gerada a rota.

Quadro 6: Tipos de Vias Públicas de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro

Nível	Nome	Características	Velocidade máxima¹¹
1	Via urbana local	Vias sem complexidade de trânsito. Caracterizadas por intersecção em nível não semaforizada, destinada ao acesso local.	30 km/h (8,3 m/s)
2	Via urbana coletora	Vias que distribuem o trânsito das vias locais para outros tipos e vice-versa	40 km/h (11,11 m/s)
3	Via urbana arterial	Vias caracterizadas por interseções em nível, controladas por semáforos e que permite ligações aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, permitindo trânsito entre regiões	60 km/h (16,67 m/s)
4	Via urbana rápida	Vias de acesso rápido, com trânsito livre, sem acessibilidade aos lotes lindeiros e travessias de pedestres	80 km/h (22,22 m/s)
5	Via rural pavimentada (rodovia)	As velocidades variam conforme o tipo de veículo: 110 km/h para veículos leves, 90 km/h para ônibus e micro-ônibus e 80 km/h para os demais veículos	80 a 110km/h (22,22 m/s a 30,56 m/s)
6	Via rural não-pavimentada (estrada)	Em diversos casos, pelas necessidades de terreno, poderão ser necessários recursos adicionais para a navegação do veículo, tais como uso de correntes nos pneus, entre outros.	60 km/h (16,67 m/s)

Fonte : BRASIL. 1997.

Informações adicionais podem ser associadas aos dados de rota: nomes de ruas, sinalizações, regras de trânsito, características do ambiente e outros elementos. No entanto, estes elementos não são necessários para navegação

¹¹ Caso não haja sinalização específica

básica na arquitetura VAT-EVA e devem ser trabalhados no âmbito das tecnologias de suporte ao sistema do veículo.

Qualquer rota obtida pelo processo de planejamento é armazenada em DR , substituindo qualquer rota anterior existente para os mesmos valores de $[p_{inicial}]$ e $[m]$.

3.5 COMPONENTES DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

Associados aos conjuntos de dados, a arquitetura organiza três componentes ou sistemas principais que permitem realizar as atividades de navegação: sistema de percepção, sistema de planejamento e sistema de mobilidade.

3.5.1 Sistema de Percepção

O Sistema de Percepção é o componente responsável por adquirir dados do ambiente e transformá-los para armazenamento nos conjuntos de dados apresentados na seção 3.4. O processo completo de aquisição, transformação e armazenamento de dados é chamado de Ciclo de Percepção, ocorrendo de forma independente e concorrente aos outros processos de navegação, realizando suas necessidades de sincronização através de marcações temporais.

Os Ciclos de Percepção são inicializados no momento em que o veículo é ligado, independentemente se o veículo está em movimento ou não, prosseguindo até o desligamento total do veículo. No entanto, mesmo que o veículo obtenha dados de colisão iminente ou que interfira em sua estrutura, considera-se que o veículo não irá utilizar os dados de percepção para movimentação exceto se o sistema de mobilidade estiver em operação.

Um Ciclo de Percepção realiza as seguintes etapas: (a) acessa todos os sensores, (b) obtém as medições de cada sensor (c) filtra as medições obtidas, de modo a obter apenas dados válidos, (d) direciona a medição para um conjunto

de transformações específicas para adequá-la ao formato do conjunto de dados conveniente, (e) armazena o dado transformado no conjunto de dados adequado e (f) ao final do ciclo de percepção consolida as medições e atualiza as variáveis do sistema correspondentes. Não há uma frequência recomendada para que o ciclo de percepção seja realizado: a arquitetura VAT-EVA propõe, inicialmente, que se utilize uma frequência mínima de 1 Hz de acordo com os tempos médios de percepção e atuação humana conforme Green (2000), ainda que ações específicas possam demandar frequências mais rápidas do ambiente.

O Sistema de Percepção da arquitetura VAT-EVA é organizado de forma a ser neutro quanto aos tipos, tecnologias e quantidades de sensores integrados. Para atender à neutralidade requisitada, o sistema de percepção segmenta e padroniza a entrada de dados e o fluxo de processamento de acordo com os tipos de dados obtidos pelos sensores:

- **Dados de restrição:** descrevem informações do ambiente que impeçam que o veículo ocupe uma determinada região do espaço, abrangendo elementos estáticos e dinâmicos de colisão, restrições do sistema de transportes, etc.
- **Dados de posicionamento:** informações que atualizam o modelo de estado do veículo para um determinado intervalo de tempo.
- **Dados de comunicação:** informações detectadas pelo veículo e que alteram seus conjuntos de dados, mas que não estão associadas aos dados de restrição, liberação e posicionamento. Podem ser resultantes de comunicação propriamente dita (através de um canal de comunicação e protocolo estabelecido) ou de medições de sensores do veículo que não possam ser vinculadas aos outros tipos de dados.

Considerando-se estes grupos, segmenta-se o sistema de percepção em três subsistemas: (a) percepção de restrição, (b) percepção de posicionamento e (c) percepção de comunicação. Cada subsistema possui interfaces padronizadas de recepção de dados por parte de sensores e algoritmos, realiza transformações próprias e é vinculado a um ou mais conjuntos de dados.

O algoritmo padrão do sistema global de Percepção é apresentado no Apêndice C.1.1 e C.1.2.

3.5.1.1 Percepção de Restrição

Percepção de Restrição é o subsistema de percepção responsável por obter medições dos sensores capazes de detectar restrições no ambiente que impeçam o veículo de ocupar um determinado local no espaço ou que possam prejudicar sua estrutura e seu processo de navegação. Como regra geral, uma restrição é um conflito entre uma medição e uma característica do Modelo do Veículo.

O conjunto de medições de restrição é representado por:

$$Q = \{ q_0, q_1, \dots, q_{max} \} \quad (3.26)$$

Onde uma medição específica de restrição q_i é modelada sob a forma:

$$q_i = \{ \text{identificador}, d, \theta, \text{abertura}, \text{prioridade}, \text{tempo} \} \quad (3.27)$$

Onde [identificador] é um marcador único associado elemento de restrição do ambiente (quando é possível obtê-lo), [d] é a distância em metros entre o veículo e a posição de restrição, [θ] é o ângulo entre o veículo e o elemento da restrição, [abertura] é o ângulo de abertura da medição, [prioridade] é o nível de medição de acordo com a hierarquia de níveis proposta neste trabalho e [tempo] é a marca temporal que designa quando a medição está disponível para uso. Deve-se considerar que [θ] deve ser ajustado para utilizar o centro geométrico do veículo como origem e não o sensor.

O armazenamento direto das medições é possível, ainda que não recomendado, já que as medições obtidas pelos sensores já estar defasadas quando inseridas nos conjuntos de dados. Neste sentido, depois do armazenamento das medições recomenda-se a utilização de um algoritmo de previsão que permita determinar o comportamento futuro das restrições armazenadas, realimentando Q com os dados previstos. O modelo utilizado pelo VAT-EVA para previsão dos dados, considera que cada elemento do ambiente é associado a um [identificador] para o qual se obtém diferentes medições. Desta forma, para duas medições contínuas no tempo é possível estimar a velocidade e orientação de um elemento específico, extrapolando seu comportamento no tempo. Esta

abordagem, no entanto, esbarra na dificuldade de extrair características de um elemento no ambiente e definir que este é o mesmo no futuro sem demandar tecnologias específicas tais como câmeras de vídeo.

O algoritmo da Percepção de Restrição é apresentado no Apêndice C.1.3.

3.5.1.2 Percepção de Posicionamento

A Percepção de Posicionamento é responsável por obter e transformar medições dos sensores que fornecem valores relacionados às variáveis do Estado do Veículo em um formato adequado para armazenamento na lista dinâmica específica no modelo do ambiente. As medições são sempre armazenadas no formato do sistema de referência padrão adotado pelo modelo do veículo, o que significa que dados obtidos em outros sistemas de referência devem ser transformados conforme a conveniência.

Um conjunto de medições de posicionamento é dado pela forma:

$$P = \{ p_0, p_1, \dots, p_{max} \} \quad (3.28)$$

Para a qual uma medição de posicionamento p_i se obtém:

$$p_i = \{ \text{atributo}, sr_i, \text{época}, \text{valor}, \text{prioridade}, \text{tempo} \} \quad (3.29)$$

Onde [atributo] representa uma variável componente do Estado do Veículo. Os componentes $[sr_i, \text{época}]$ designam o sistema de referência e a época para a qual a medição foi obtida. No processo de transformação das medições, convertem-se os dados do sistema de referência espacial no qual a medição está para o sistema de referência padrão do veículo: nos casos em que isto não é possível, descarta-se a medição. No entanto, quando é possível realizar a conversão, $[sr_i, \text{época}]$ armazenam o sistema de referência e a época original no intuito de permitir eventuais correções posteriores. Outros componentes da medição de posicionamento incluem o [valor] da variável, a [prioridade] de acordo com os níveis propostos neste trabalho e a marca de [tempo] para quando a medição foi obtida.

O algoritmo de percepção de posicionamento é apresentado no Apêndice C.1.4.

3.5.1.3 Percepção de Comunicação

A Percepção de Comunicação obtém dados padronizados enviados mediante um protocolo de comunicação convencionado. Os elementos com os quais se mantém comunicação podem ser outros veículos, elementos do sistema de transportes e do condutor. Por conveniência, medições que não podem ser modeladas adequadamente por outros tipos de percepção são também direcionadas para a Percepção de Comunicação. Quando os dados obtidos pela Percepção de Comunicação podem ser tipificados como restrição, liberação ou posicionamento, eles devem ser direcionados para os respectivos subsistemas de percepção de modo a receberem melhor tratamento. Para os dados que não se encontram nestas condições, estes são armazenados na lista dinâmica de comunicação.

O conjunto de dados de comunicação é dado por:

$$C = \{ c_0, c_1, \dots, c_{max} \} \quad (3.30)$$

Onde um determinado dado de comunicação específico c_i é modelado sob a forma:

$$c_i = \{ \text{identificador}, \text{origem}, \text{tempo}, Q, P, COM \} \quad (3.31)$$

Onde [identificador] é o identificador convencionado para regulamentar a comunicação, [origem] define o agente originador da mensagem e [tempo] é o marcador temporal de origem da mensagem. Os conjuntos $[Q, P]$ definem conjuntos de restrições e posicionamentos específicos associados à comunicação em questão. COM é um conjunto de dados de comunicação dados sob a seguinte forma:

$$COM = \{ com_0, com_1, \dots, com_{max} \} \quad (3.32)$$

Na qual:

$$com_i = \{ \text{atributo, valor, prioridade, tempo} \} \quad (3.33)$$

Onde [atributo] é um atributo de sistema (i.e., um atributo variável de qualquer conjunto de dados) que será modificado pela comunicação, [valor] especifica o valor textual ou numérico associada à variável, [prioridade] define o nível associado à medição e [tempo] define a marca temporal para quando a medição foi obtida.

O algoritmo do subsistema de percepção de comunicação é apresentado no Apêndice C.1.5.

3.5.2 Sistema de Planejamento

O Sistema de Planejamento da arquitetura VAT-EVA é responsável por adquirir uma rota ideal que conecte a posição atual do veículo à missão estabelecida pelo usuário. O sistema de planejamento implementa as seguintes etapas: (a) obtém a missão do condutor, (b) valida a missão, (c) consulta sua base de dados de rotas para verificar a existência que interligue sua posição atual à missão e (d) armazena a rota no Modelo de Navegação para uso por parte dos outros sistemas.

O Sistema de Planejamento é o primeiro sistema a ser executado pelo veículo quando o condutor seleciona o tipo de navegação (autônoma ou controlada) que será realizada. O sistema solicita do condutor a inserção da missão (local onde chegar) mediante uma interface adequada que converta a missão em coordenadas válidas dentro do sistema de referência espacial utilizado pelo veículo. A missão proposta, se válida, é inserida no Modelo de Navegação e o processo de planejamento obtém a posição atual do veículo, também inserindo-a no modelo de navegação.

A seguir, o sistema de planejamento calcula a distância e a orientação entre a posição atual do veículo e a posição da missão, criando um grafo e associando estes dados à $[R_m^{p_{inicial}}]$ do Modelo de Navegação. Quando o veículo realiza navegação reativa ou controlada, esta será a $[R_m^{p_{inicial}}]$ final que será utilizada

pelo sistema de mobilidade, pelo que o sistema de planejamento encerra após este processamento.

Nos desenvolvimentos de navegação autônoma deliberativa e híbrida, após a criação do grafo inicial, consulta-se a missão e a posição atual do veículo na base de dados interna [DR] do veículo para verificar se há uma rota que atenda a missão. A arquitetura VAT-EVA considera que o sistema de navegação não deve ser capaz de gerar suas próprias rotas, exceto para curtas distâncias, por três motivos: em primeiro lugar, não existe um algoritmo de planejamento confiável para todas as necessidades de navegação e, ainda que algoritmos como Dijkstra e Busca A-Star possam ser eficientes para diversos casos, não há garantias que consigam encontrar sempre uma rota confiável em tempo hábil. Em segundo lugar, o sistema de transportes é dinâmico e um planejamento de rota eficiente deve considerar os dados mais atuais disponíveis do sistema, o que pode ser de difícil manutenção de forma contínua para um veículo. Em terceiro lugar, ainda que a maior parte dos usuários de veículos sempre se locomovam para os mesmos lugares nas suas atividades diárias, alguns usuários navegam por grandes extensões de território (por exemplo, aqueles que fazem transporte de carga), o que pode exigir capacidade de grande armazenamento de dados.

Para solucionar a necessidade de rotas atualizadas e adequadas ao contexto de navegação, o modelo VAT-EVA considera que sistema de planejamento deve ser capaz de se comunicar com fornecedores externos de rota que forneçam rotas atualizadas e adequadas para navegação, sendo desnecessário ao veículo conhecer como esta rota foi gerada. A geração externa de rotas permite a integração de recursos e estrutura computacional para processamento contínuo, atualização constante e integrada dos dados obtidos do sistema de trânsito, combinação de múltiplos algoritmos de planejamento conforme a conveniência e geração de rotas para múltiplos veículos de forma a tornar o sistema de transportes integrado e inteligente. A geração de rotas externas envolve, no entanto, a capacidade do veículo comunicar-se com fornecedores de rotas, o que torna o sistema dependente de um sistema de comunicação permanentemente disponível.

Desta forma, ao validar uma missão, o veículo consulta bases de dados externas para obter uma rota adequada à sua posição atual e sua missão. A rota adquirida é armazenada nos $[DR]$ do Modelo de Navegação (substituindo qualquer rota anterior associada aos mesmos dados) e é associada à $[R_m^{p_{inicial}}]$. Caso não seja possível acessar o provedor externo de rotas ou obter uma rota viável, o veículo ainda pode consultar sua base de dados embarcada $[DR]$ para verificar se existe alguma rota preliminarmente armazenada que atenda à missão e, se existir, esta rota é armazenada em $[R_m^{p_{inicial}}]$ para uso no processo de navegação. Como condutores comuns tendem a seguir os mesmos caminhos de navegação cotidianamente, o sistema pode cumprir esta necessidade sem contínuas consultas externas. Nos casos em que não seja possível obter uma rota de uma fonte externa ou de uma base interna do veículo, o sistema de navegação retorna uma mensagem conveniente ao condutor.

Não se recomenda que a busca da missão e da posição atual do veículo em suas bases de dados internas ou externas seja realizada de forma exata, já que em diversas situações, as coordenadas de posição inicial e missão não podem ser associadas diretamente a um vértice específico de uma rota de navegação baseada no sistema de transportes: isto pode ocorrer porque o VAT pode estar em vias não-públicas (por exemplo, em uma garagem ou em um local particular), porque as vias das rotas podem considerar apenas as regiões médias da via (desprezando os nós ao redor, mesmo que sejam livres de navegação), ou, ainda, porque as coordenadas das rotas não foram medidas de forma adequada. Desta forma, ao buscar-se uma determinada posição (missão ou posição atual) na base externa, calcula-se uma região de incerteza conveniente em relação às coordenadas de posição e missão obtidas, adquirindo a melhor rota e obtendo os nós das rotas que estejam dentro destas regiões. O modelo VAT-EVA adota, por convenção, uma região de incerteza de 1 m^2 .

Nos casos em que se obtém duas ou mais rotas diferentes para uma mesma missão, adquire-se aquela de menor custo de acordo com uma avaliação conveniente (a análise padrão do VAT-EVA considera o caminho mais rápido – não necessariamente o mais curto - que cumpre uma missão), porém se duas ou mais rotas possuem o mesmo custo, utiliza-se qualquer uma das obtidas.

A $[R_m^{p_{inicial}}]$ gerada para navegação é atualizada com a inclusão de dois novos nós: um nó inicial que é $[p_{inicial}]$ (posição inicial do veículo) e um nó final que é $[m]$, (que é a posição final do veículo) de modo que estes elementos sejam vinculados à rota, independentemente da incerteza na aquisição da rota inicial. Os valores associados à $[p_{inicial}]$ e $[m]$ podem ser expandidos, conforme a necessidade, para suportar rotas de curto prazo, antes de se vincular às vias públicas de fato. A rota ajustada obtida é associada novamente a $[R_m^{p_{inicial}}]$.

O algoritmo de planejamento é apresentado no Apêndice C.2.

3.5.3 Sistema de Mobilidade

O Sistema de Mobilidade é o sistema responsável pela execução da navegação propriamente dita, implementando a Estratégia de Movimento e a Tomada de Decisão. Para atender a este objetivo, o Sistema de Mobilidade: (a) obtém a ação a ser realizada baseada na rota proposta pelo sistema de planejamento, (b) obtém os dados do ambiente, (c) realiza a integração destes dados para gerar a ação real a ser executada pelo veículo e (d) entrega a ação aos atuadores.

O Sistema de Mobilidade é iniciado pela obtenção da posição do veículo e do próximo vértice da rota planejada $[R_m^{p_{inicial}}]$ a ser atingido, obtendo-se a distância e ângulo de orientação entre estas duas regiões. Os valores de distância e orientação são repassados para o Sistema de Tomada de Decisão.

O Sistema de Tomada de Decisão é o sistema central do Sistema de Mobilidade e possui a função de obter dados do sistema de planejamento e do sistema de percepção, de modo a obter a melhor opção de ação a ser realizada no ambiente. O Sistema de Tomada de Decisão e suas operações são descritos detalhadamente na seção 3.3 e o algoritmo é apresentado no Apêndice C.3.3 e C.3.4.

Após o processamento do Sistema de Tomada de Decisão, este retorna ao Sistema de Mobilidade os valores de distância e o ângulo de orientação para movimentação recomendados para serem executados no ambiente para a próxima ação de navegação. A distância e o ângulo de orientação obtidos não

são repassados diretamente aos atuadores, mas realiza-se o ajustamento da distância a ser executada pelo veículo. A distância que deverá ser considerada é o menor valor obtido entre a (a) velocidade máxima permitida pelo ambiente (m/s), (b) a velocidade máxima que pode ser obtida pelo veículo (m/s) e a (c) distância gerada pela tomada de decisão. A distância obtida será convertida na velocidade com que o movimento deverá ser realizado em (m/s). Os valores de distância e orientação serão repassados aos atuadores que, então, convertem os dados obtidos em ações individuais, aplicando-se as restrições próprias dos atuadores (por exemplo, o ângulo máximo que o veículo pode realizar seu esterçamento).

Após realizar sua ação, o veículo estima sua posição com os dados da movimentação realizada, provendo assim um recurso mínimo de dados sobre seu próprio estado e do ambiente (Nível 1) que podem ser atualizados posteriormente por dados mais prioritários quando disponíveis. Finalizando o ciclo o sistema de mobilidade verifica se alguma das seguintes condições ocorre: (a) o veículo atingiu a missão, (b) condutor interrompeu a navegação, (c) a missão se tornou inalcançável ou (d) não há energia suficiente ao veículo para atingir a missão. Caso nenhuma destas condições ocorra, o veículo verifica sua distância em relação ao próximo vértice da rota planejada e reinicia o cálculo de distância e ângulo de orientação para movimento de forma contínua. Caso atinja a missão proposta em um limite de distância aceitável, finaliza-se o Sistema de Mobilidade, retornando ao condutor uma mensagem adequada.

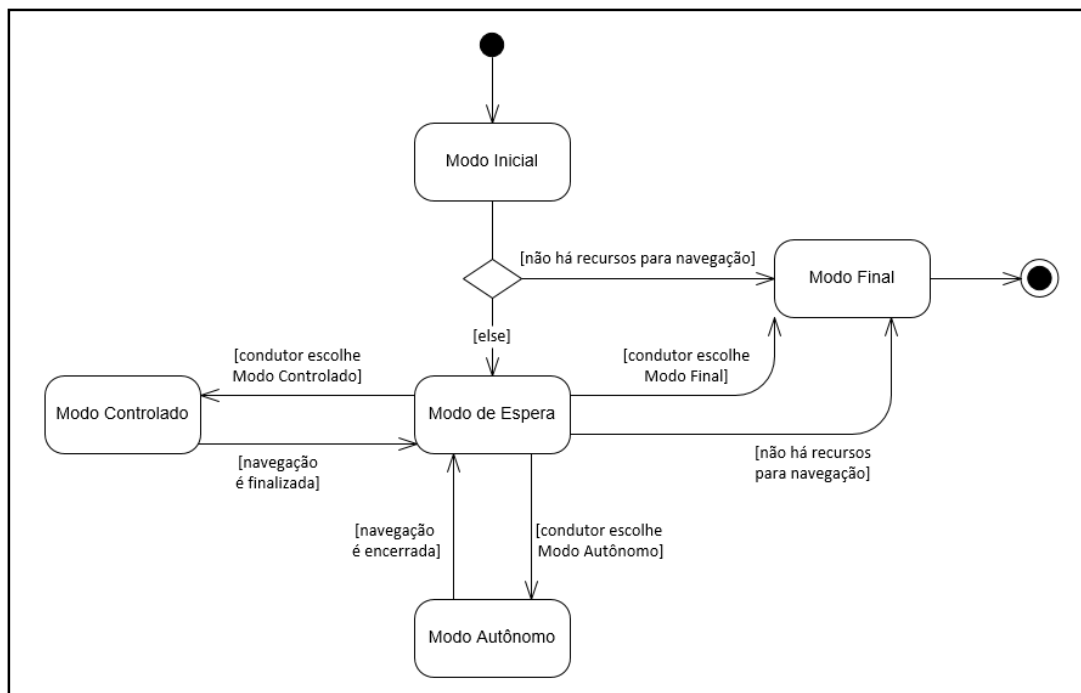
O algoritmo de mobilidade e seus subsistemas são apresentados no Apêndice C.3.

3.6 MODOS DE OPERAÇÃO DA ARQUITETURA

Os modos de operação definem os regimes de trabalho que o sistema de navegação da arquitetura pode assumir para realizar suas atividades. Estes modos são cinco: inicial, espera, autônomo, controlado e final, organizados conforme a Figura 23, sendo que o veículo pode assumir um único modo de operação em um determinado instante do tempo. Outros modos convenientes a

desenvolvimentos específicos podem ser inseridos na arquitetura: pela natureza da arquitetura e para garantir a consistência do fluxo de controle, qualquer modo adicional deve ser incluído entre o modo de espera e o modo final, preferencialmente após o modo de espera.

Figura 23: Modos de operação da arquitetura VAT-EVA



Fonte: O Autor.

O modo inicial é assumido quando o veículo é ligado e o sistema de navegação é inicializado. Neste modo, o sistema de navegação realiza a conexão com a plataforma veicular ao qual está integrado e inicializa o processo de percepção, sincronizando seu relógio interno com um padrão de tempo externo (atividade importante para manter a consistência da verificação dos marcadores temporais e corrigir possíveis erros, por exemplo, de deriva do relógio), verificando a integridade dos diversos componentes (sensores e atuadores) da arquitetura e analisando se há recursos suficientes (em especial, energéticos) para executar ações de navegação. Por convenção, a arquitetura VAT-EVA considera que todos os sensores e atuadores associados ao sistema devem estar operacionais. Se existirem recursos suficientes para inicialização do sistema, é inicializado o modo de espera do sistema, caso contrário, é executado o modo final de operação.

O modo de espera é o modo de operação executado imediatamente após o modo inicial, o modo autônomo e o modo controlado: ele reinicializa as variáveis de sistema após a execução de outros modos, verifica se o sistema mantém recursos para navegação, sincroniza o relógio do sistema de acordo com um padrão de tempo externo e aguarda a escolha de um modo de operação por parte do usuário: os modos escolhidos podem ser o modo autônomo, o modo controlado e o modo final. Outros modos de operação podem ser adicionados ao modo de espera conforme a necessidade de desenvolvimento.

No modo autônomo de operação, o veículo é plenamente controlado pelo sistema de navegação sem intervenção do condutor humano, que apenas pode cessar a navegação autônoma. Após a seleção do modo de autônomo de operação, imediatamente o sistema solicita ao condutor a inserção de uma missão (local a ser atingido) através de uma interface adequada. O modo autônomo então iniciará o processo de planejamento para obter uma rota adequada para atender a missão proposta, submetendo a rota obtida para aprovação do condutor. Caso a rota seja aprovada, o veículo iniciará o processo de mobilidade. Quando finalizar a navegação ou quando determinar que não é possível executar uma determinada rota, o algoritmo de controle finaliza adequadamente as variáveis de sistema e assume, novamente, o modo de espera.

No modo controlado de operação, o veículo é guiado pelo condutor ou pela infraestrutura, não executando ações de navegação autônoma. O processo de planejamento não é realizado, enquanto o processo de mobilidade recebe exclusivamente as ações de controle. Conforme a necessidade, o processo de percepção pode ser inativado ou ser utilizado apenas para fornecer dados sobre o ambiente, sem impactar o processo de navegação.

O modo final de operação é um modo de operação escolhido a partir do modo de espera, no qual o sistema encerra todos os processos em execução do veículo, realiza as atividades necessárias para que o veículo assuma uma configuração final segura (i.e., que permita ao veículo parar de forma adequada e sem possibilidade preliminar de colisão) e faz a desconexão da plataforma veicular robótica.

Os algoritmos que estruturam cada modo são apresentados no Apêndice D.

3.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma proposta de arquitetura de veículo autônomo chamado de VAT-EVA. O componente central da arquitetura é o sistema de Tomada de Decisão baseado em uma Hierarquia de Prioridades. A Hierarquia de Prioridades distingue cada dado manipulado obtido pela arquitetura em um nível específico de acordo com a sua origem e operações que serão aplicadas sobre ele. Baseado na hierarquia, cria-se uma estrutura de dados específica chamada de Grade de Prioridades que organiza os dados obtidos pelo veículo em uma estrutura única sobre a qual se aplica etapas contínuas de processamento para tomada de decisão. O produto final da tomada de decisão são duas variáveis (distância e orientação) a serem realizadas pelo veículo para sua movimentação.

Ainda que a Grade de Prioridades possa ser suportada por diferentes técnicas computacionais, nesta pesquisa organiza-se um conjunto de componentes integrados que permitem o desenvolvimento de um sistema de navegação robótica. Estes componentes são divididos em dois grupos principais: (a) conjuntos de dados – que modelam as diversas variáveis a serem tratadas no processo de navegação e (b) processos de navegação- que estruturam as atividades necessárias à tomada de decisão. Os processos de navegação são segmentados em dois ciclos de processamento: (a) Ciclo de Percepção - que abrange o processo de percepção, responsável por adquirir dados dos sensores, aplicar transformações, consolidar dados (oferecendo, por exemplo, a posição atual do veículo) e disponibilizar os resultados nos conjuntos de dados do sistema; e (b) Ciclo de Navegação - que combina os processos de planejamento e mobilidade para adquirir a rota a ser realizada no ambiente, integrar com dados obtidos dos conjuntos de dados, obter a ação conveniente a ser realizada no ambiente através da tomada de decisão e refinar a ação obtida para execução final. Enquanto o Ciclo de Percepção é realizado de forma contínua desde o momento que o veículo é ligado até seu desligamento, o Ciclo de Navegação é realizado enquanto for necessário ao veículo movimentar-se. A integração entre os ciclos é realizada pelo compartilhamento dos conjuntos de dados e a

sincronização é realizada mediante marcas temporais associadas a todos os dados trabalhados pela arquitetura.

Estes ciclos são estruturados em modos de operação, que definem os tipos de operações que estão em execução em um determinado momento no sistema e resguardam a integridade das atividades do veículo (sendo que apenas um modo de operação deve ser executado em um determinado momento): (a) modo inicial - inicialização do sistema e das variáveis, assim como verificação dos recursos disponíveis, (b) modo de espera – faz verificações periódicas dos recursos do sistema e aguarda as instruções de modo de operação por parte do usuário; (c) modo autônomo – realiza os processos necessários para a navegação autônoma; (d) modo controlado – realiza os processos necessários para navegação controlada (i.e., gerenciada por um condutor) e (e) modo final – que realiza as verificações e operações de encerramento das atividades do sistema.

4 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA

“If a man will begin with certainties, he shall end in doubts; but if he will be content to begin with doubts, he shall end in certainties.”

Francis Bacon, *The Advancement of Learning* (1605)

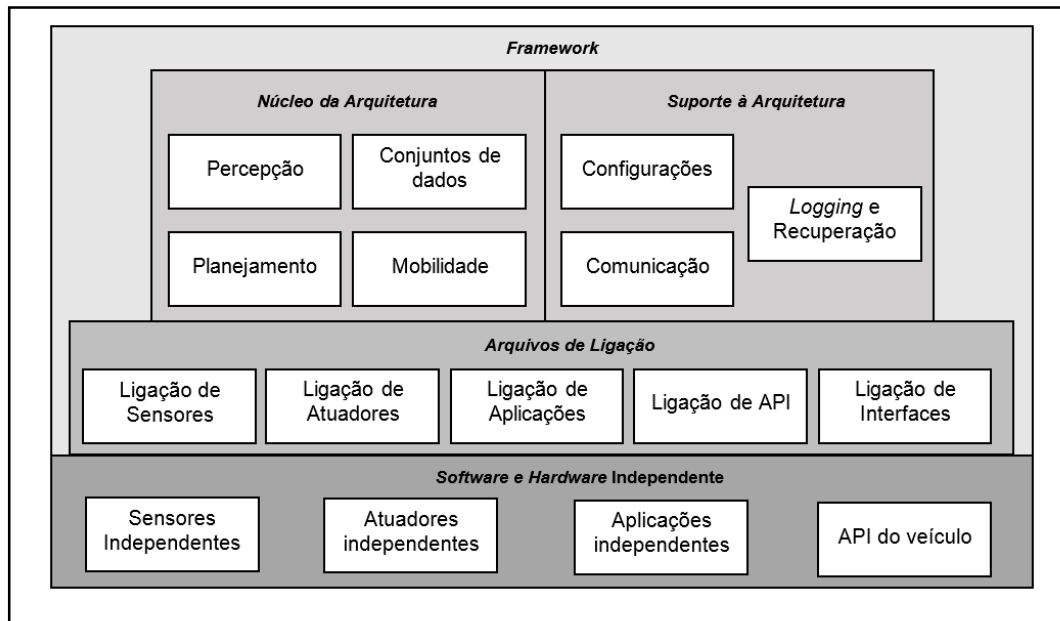
Este capítulo descreve o desenvolvimento de aplicações de navegação autônoma baseadas na arquitetura VAT-EVA. O capítulo divide-se em duas partes: a primeira parte descreve a criação de um sistema de *software* que implementa a arquitetura e que fornece os componentes necessários para a criação de novas aplicações. O sistema é integrado a uma plataforma robótica específica para validação e testes pertinentes. A segunda parte apresenta um conjunto de testes práticos, os resultados obtidos e as recomendações de modificações na arquitetura proposta.

4.1 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO ROBÓTICA

4.1.1 Desenvolvimento do sistema

A arquitetura VAT-EVA pode ser implementada em diversos modelos e formatos computacionais. O sistema de navegação baseado na arquitetura foi desenvolvido sob duas formas: uma versão padrão pública utilizando a linguagem de programação C para o ambiente operacional Linux e uma versão para testes e prova de conceito utilizando a linguagem de programação *Microsoft Visual Basic C# 2010* integrada aos recursos do *Microsoft Robotics Developer Studio 4*. Os testes deste trabalho são realizados sobre a versão de testes.

Para desenvolver uma versão de sistema de navegação autônoma funcional, cada subsistema da arquitetura VAT-EVA foi sistematizado em um componente específico e foram desenvolvidos novos componentes (que não fazem parte da arquitetura original). A organização dos componentes do sistema é apresentada na Figura 24, na qual a relação de adjacência estabelece os limites de interação entre os grupos de componentes.

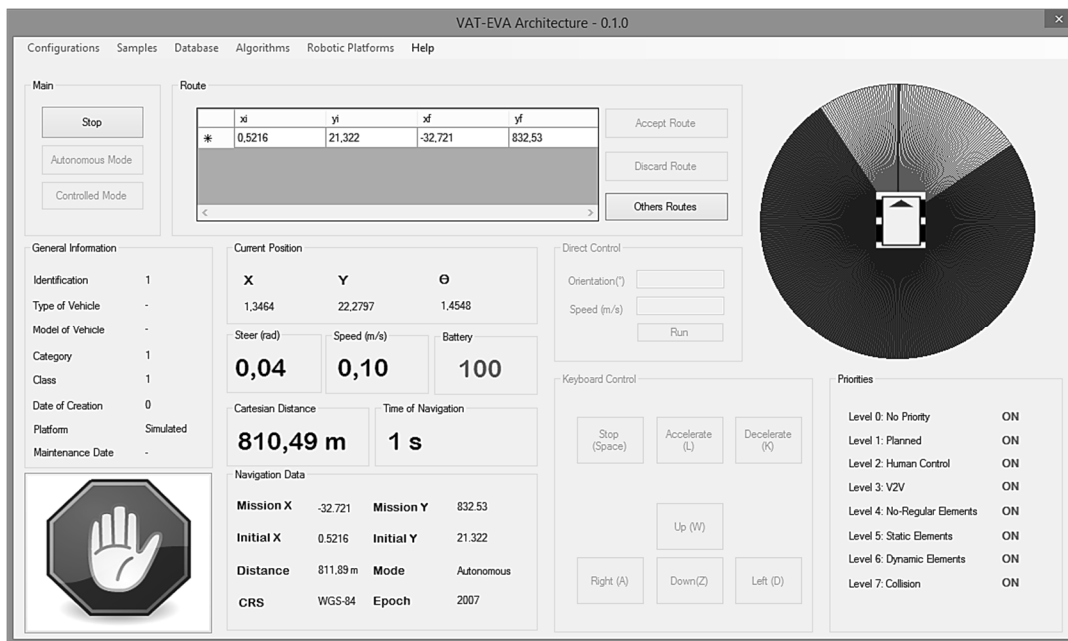
Figura 24: Diagrama de blocos do sistema de navegação baseado na arquitetura VAT-EVA

Fonte: O Autor.

Enquanto o Núcleo da Arquitetura trata a arquitetura propriamente dita, os componentes adicionados são organizados em dois grupos: Suporte à Arquitetura e Arquivos de Ligação. Os componentes de Suporte à Arquitetura possuem o objetivo de parametrizar e adicionar funcionalidades específicas à arquitetura. Os componentes são (a) Configurações - que estabelecem os parâmetros iniciais de funcionamento do sistema; (b) Logging e recuperação - que gerencia as alterações nos sistemas e efetua ações de recuperação de dados e (c) Comunicação - que estabelece um componente de entrada e saída de dados baseados na *eXtensible Markup Language* (XML) para atender às necessidades de comunicação do veículo (não é desenvolvido um sistema completo de comunicação). Os Arquivos de Ligação são componentes criados para integrar os recursos de dispositivos robóticos ao sistema de navegação.

A interface de controle do sistema de navegação desenvolvido é apresentada na Figura 25. Na versão padrão, o sistema é gerenciado através do modo texto, não apresentando interfaces gráficas nativas.

Figura 25: Interface gráfica de controle do sistema de navegação.

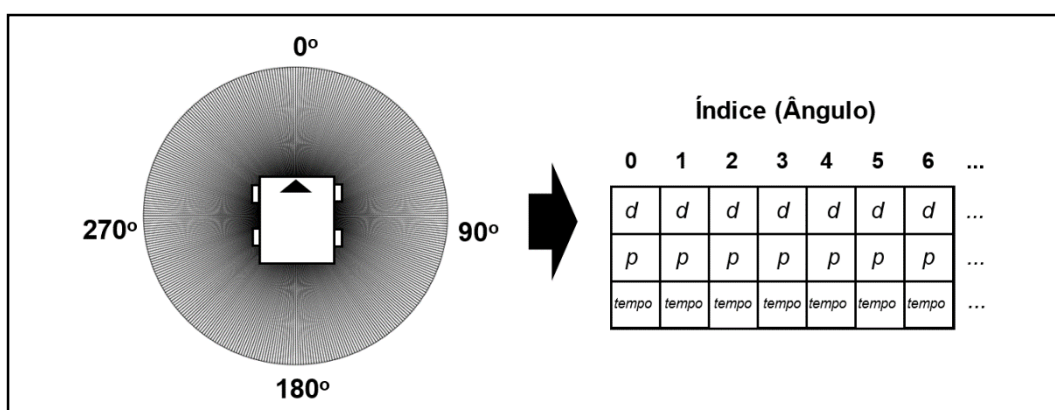


Fonte: O Autor.

4.1.2 Características de desenvolvimento da Grade de Prioridades

A Grade de Prioridades do sistema de navegação foi desenvolvida na forma de uma matriz computacional com três vetores com 360 posições cada: (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 do vetor representa o ângulo médio da seção ao qual está associada e que uma determinada posição de um vetor está vinculada às mesmas posições dos outros vetores (Figura 26).

Figura 26: Conversão de uma Grade de Prioridades para uma matriz computacional



Fonte: O Autor.

O cálculo da distância conjunta e da orientação de movimento é realizado através de uma busca simples sobre a matriz (Figura 27): obtém-se o vetor de distância e agrupa-se o número de posições necessárias para compor a Região de Agrupamento. Então, desloca-se a Região uma posição por vez até percorrer todos os elementos do vetor e de forma que todas as posições do vetor ocupem a primeira posição da Região de Agrupamento. Para cada deslocamento realizado, obtém-se a Distância Conjunta das regiões em questão a qual é comparada com as anteriores, mantendo-se continuamente o maior valor de distância e o índice associado. Após percorrer todo o vetor, obtém-se o valor mantido e a orientação é calculada como a diferença entre a orientação atual do veículo e o ângulo médio do agrupamento escolhido.

Figura 27: Exemplo de cálculo de distância conjunta em uma Grade de 45° de abertura com Regiões de Agrupamento de três setores circulares



Fonte: O Autor.

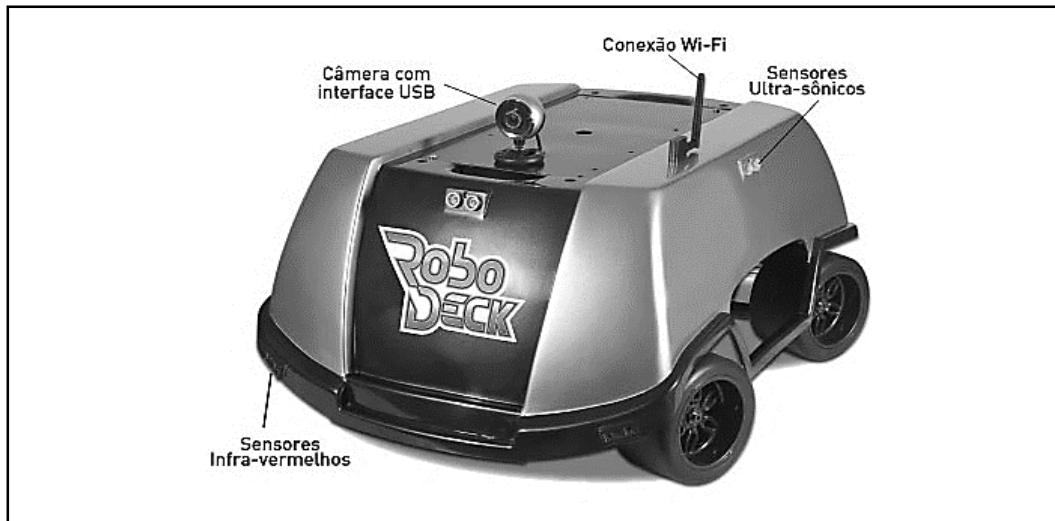
4.2 APLICAÇÃO ESPECÍFICA DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

4.2.1 Plataforma robótica

Para o teste e validação do sistema de navegação, este foi integrado à uma plataforma robótica específica chamada de Robodeck (Figura 28), um robô móvel com tecnologia brasileira, equipado com quatro rodas e um conjunto de

sensores nativos, que tem como proposta servir para pesquisas científicas e educacionais (ORLANDINI, 2012).

Figura 28: Plataforma Robodeck e seus componentes



Fonte: XBOT (2011a).

O Robodeck não possui todas as características de um VAT, mas tem sido adaptado e utilizado pela EVA do PTR-EPUSP como um veículo em escala reduzida para aplicar e simular técnicas de navegação antes da sua transferência para veículos de transportes reais. As características da plataforma robótica são descritas no Apêndice E.

A integração entre o sistema de navegação e a plataforma Robodeck é realizada através da utilização do *Robodeck Software Development Kit* disponibilizado pelo fabricante. A aplicação de navegação não foi embarcada diretamente no veículo mas utilizada em um equipamento computacional externo que envia e recebe dados do veículo via comunicação por rede sem-fio em uma abordagem "mestre-escravo". Esta abordagem foi adotada pela necessidade de intervenção direta sobre a navegação em casos de colisão grave iminente, já que a plataforma não possui uma interface ao usuário disponível na próprio veículo.

4.3 TESTES DO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

4.3.1 Metodologia de testes

Para avaliação da arquitetura e do sistema de navegação, realizou-se um conjunto de testes simulando as principais situações de trânsito nas quais um condutor normalmente participa. Inicialmente verificou-se que as seguintes ações de navegação são comumente realizadas por um condutor médio durante o seu Ciclo de Navegação:

- a. **Sair e entrar no estado de estacionamento:** atividade na qual o condutor inicializa ou finaliza as operações de navegação em um estado de segurança que permita entrar/sair em uma via de transportes;
- b. **Ações de inicialização da rota de navegação:** atividade na qual o condutor, ao entrar em uma via do sistema de transportes, realiza as ações necessárias para iniciar a rota de navegação planejada;
- c. **Desviar de possíveis obstáculos e retornar para rota de navegação planejada:** atividade na qual o condutor deve reconhecer obstáculos (estáticos ou dinâmicos) do ambiente e, sempre que possível, desviar destes obstáculos sem sair de sua rota ou, quando não possível, parar o veículo até que o obstáculo seja retirado;
- d. **Cumprir as regras de trânsito:** atividade na qual o condutor verifica as regras de trânsito (estáticas e dinâmicas) vigentes em uma determinada situação de trânsito e quais devem ser cumpridas dentro de acordo com seu contexto;
- e. **Escolher entre duas ou mais opções de ação de movimento aquela mais adequada para atender a rota planejada de navegação:** em diversas situações de trânsito, um condutor possui duas ou mais opções de ação, devendo escolher e realizar de forma consistente aquela mais adequada para atingir a missão proposta.

Aplicaram-se testes específicos para cada tipo de ação com o intuito de avaliar o comportamento da arquitetura e determinar as condições ideais de operação, de acordo com uma situação específica. Posteriormente, foram realizados testes

de navegação completos, nos quais analisam-se o comportamento integrado das ações de navegação.

4.3.2 Testes específicos

4.3.2.1 Testes de estacionamento e inicialização de rota

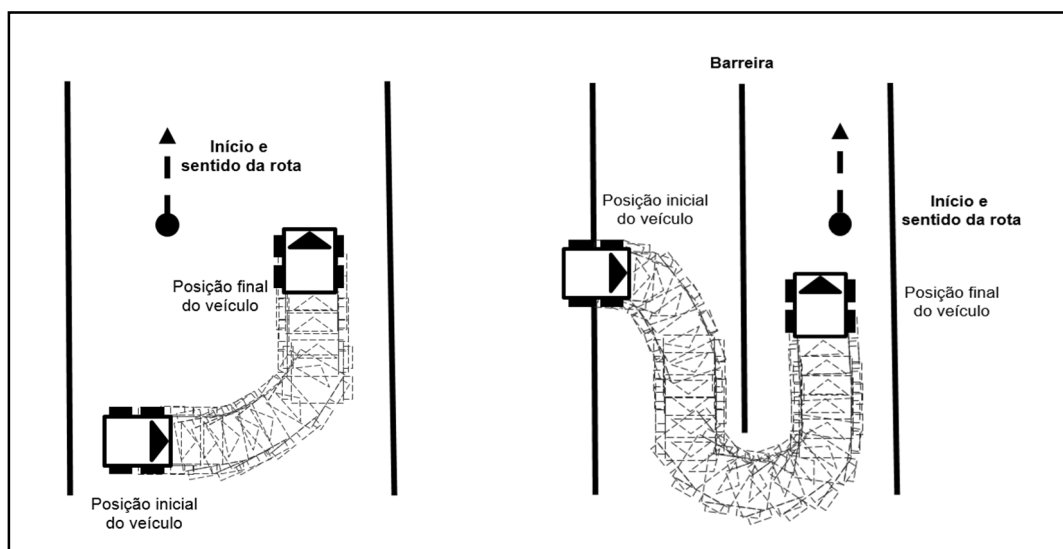
Ao iniciar sua navegação, um veículo deve realizar dois tipos de atividades: (a) sair da posição de estacionamento – que consiste em iniciar os recursos do veículo, iniciar sua movimentação e realizar ações para desviar das possíveis restrições próximas e (b) entrar na via de transportes para navegação – que consiste em, a partir da saída do estado de estacionamento, iniciar ações de movimentação para posicionar-se de forma a iniciar a rota planejada. Ao finalizar sua navegação, o veículo deve realizar estas ações de forma inversa: (a) sair da via de transportes – i.e., da posição final da sua rota, iniciar ações para encontrar uma posição adequada para iniciar suas ações de estacionamento e (b) entrar em estado de estacionamento – i.e., consiste em realizar movimentos para deixar o veículo em um estado final de segurança, finalizar sua movimentação e encerrar adequadamente as atividades de navegação.

As atividades de entrada/saída de estacionamento e de entrada/saída da via de transportes são tipos de navegações locais, i.e., assemelham-se as características de uma navegação (sair de um estado inicial e atingir um estado final), porém com missões distintas: no caso das atividades de estacionamento, o objetivo é sair/entrar em um estado estático de segurança (por exemplo, parar em um estacionamento particular) que, em geral, não é o mais recomendado para iniciar/finalizar o processo de navegação. Para entrar neste estado, o veículo deve ser capaz de interagir com restrições locais que, em geral, não fazem parte do sistema oficial de transportes. Nos testes com a arquitetura VAT-EVA, os testes preliminares de entrada/saída no estado de estacionamento demonstraram que a arquitetura, de forma isolada, não é eficiente para a realização deste tipo de ação, pois é orientada para realizar suas ações de navegação de forma global, não possuindo recursos embarcados adequados para realizar o estacionamento. Desta forma, é necessário integrar técnicas

específicas de estacionamento ao veículo. No entanto, os mesmos princípios testados para entrada/saída para via de transportes podem ser, de forma global, aplicadas também para ações de estacionamento.

No caso da entrada/saída da via de transportes, em geral, a posição obtida pelo veículo após sair do estado de estacionamento ou ao querer entrar neste estado, não é a mais adequada para iniciar a navegação propriamente dita. Considera-se que uma posição adequada inicial é aquela na qual o veículo realize a menor quantidade possível de ações de movimento para iniciar o atendimento da rota proposta, o que porém é alterado pelas regras de trânsito e restrições do ambiente (Figura 29).

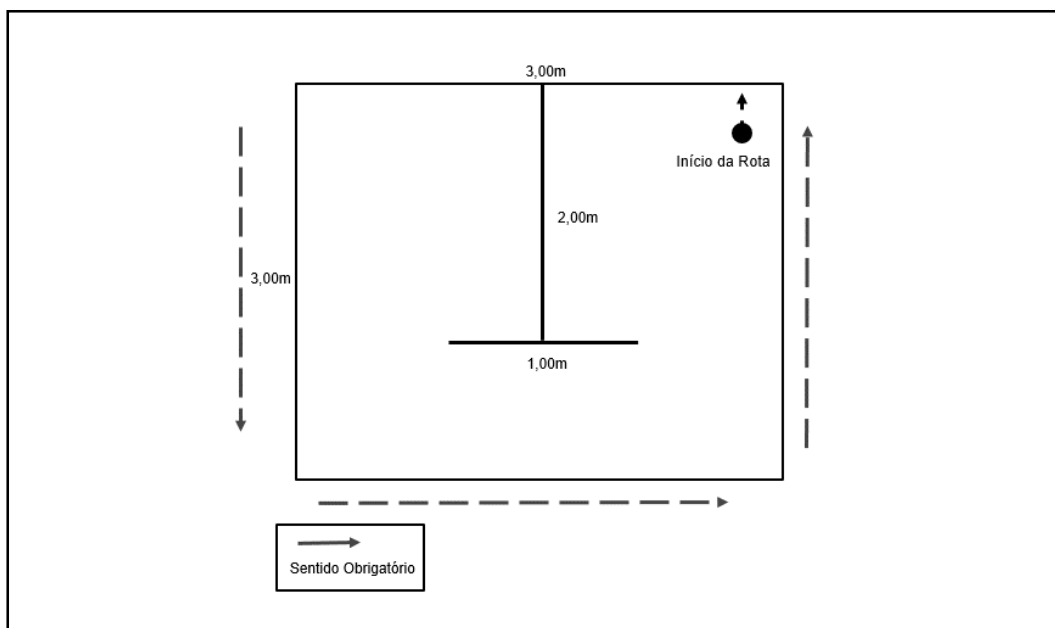
Figura 29: Exemplos de ações para inicialização de navegação



Fonte: O Autor.

Para avaliação deste comportamento por parte da arquitetura VAT-EVA, realizou-se um conjunto de testes considerando um cenário de 3,00 x 3,00 metros configurado com restrições conforme a Figura 30. O objetivo proposto foi que, a partir de uma posição e orientação iniciais aleatórias, o veículo deveria realizar ações de correção de posicionamento e orientação para iniciar sua navegação. Para isto estabeleceu-se um ponto fixo orientado no ambiente que serve como ponto de chegada do veículo.

Figura 30: Configuração do ambiente para testes de inicialização de navegação



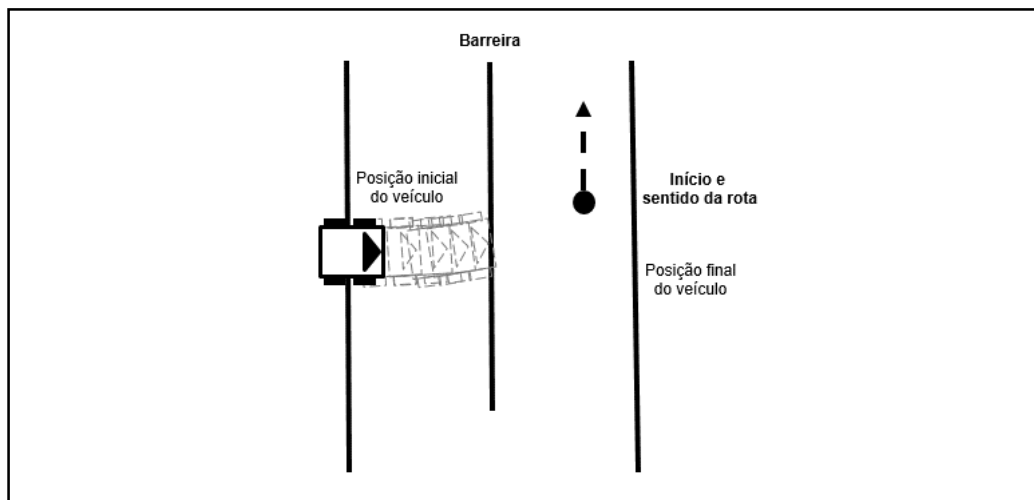
Fonte: O Autor.

Em termos gerais, o ajustamento da posição do veículo para iniciar a missão é semelhante a um processo de navegação, na qual o veículo deve, a partir de uma posição inicial, atingir uma posição final (que se trata do início da rota de navegação). No entanto, diferentemente da navegação comum, o foco desta atividade não é, especificamente, atingir uma coordenada específica, mas também posicionar-se com uma orientação adequada para iniciar a navegação.

Desta forma, torna-se necessária a aquisição de dados acurados da orientação do veículo em relação ao sistema de referência espacial adotado: a ausência de um sensor que adquira estes dados faz com que o veículo sempre tenha que ser posicionado em uma posição inicial ideal para iniciar a navegação.

Uma limitação detectada na arquitetura VAT-EVA padrão é a de que o veículo possui a tendência de, a partir da sua posição inicial, orientar-se em linha reta para o próximo vértice da rota e, só então, orientar-se corretamente para iniciar a rota de navegação. Isto ocorre porque a arquitetura é construída para gerar uma rota onde o primeiro vértice é a posição inicial do veículo e o segundo vértice a primeira posição da rota. Para alguns casos, a transição entre a posição atual do veículo e a segunda posição da rota pode ser realizada em linha reta sem maiores problemas, mas em outros casos, não é possível a transição em linha reta por limitações das regras de trânsito e restrições da via (Figura 31).

Figura 31: Exemplo da tendência da arquitetura direcionar-se em linha reta



Fonte: O Autor.

Para evitar a tendência do veículo direcionar-se em linha reta para a posição inicial do início da rota, as soluções encontradas são:

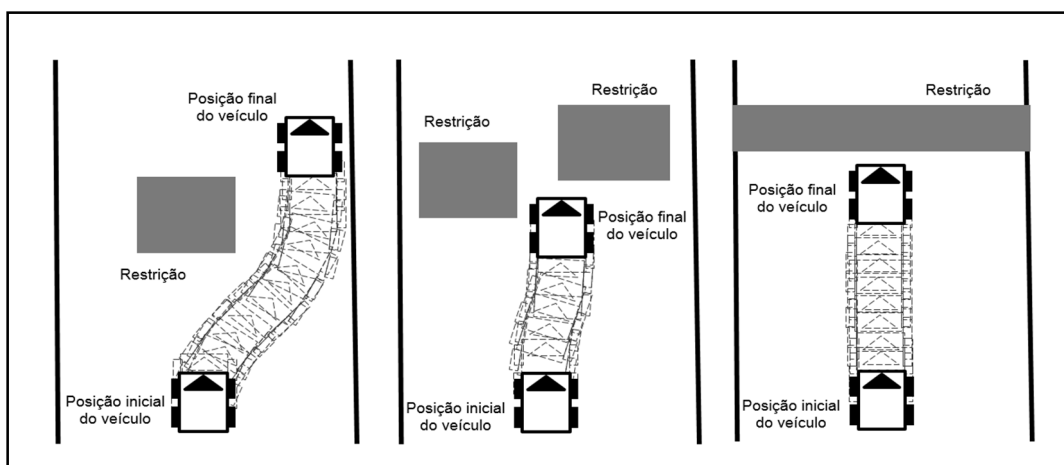
- **O condutor conduzir o veículo até a posição inicial de navegação** – reduzindo o tempo de navegação autônoma e dependendo do condutor para determinar quando uma navegação autônoma deve iniciar ou não.
- **O veículo gerar rotas locais que conectem sua posição à posição inicial da rota** - ainda que a arquitetura recomende que o sistema de navegação não gere suas próprias rotas (por motivos de limitação de recursos, necessidade de atualização constante de dados e impossibilidade de se determinar que uma rota possa ser gerada), a geração automática (de forma reativa ou sobre dados embarcados) ou gravação de uma condução guiada por um condutor podem ser adequadas para utilização em pequena escala, onde as restrições anteriormente citadas sejam anuladas.

Em 24 testes específicos utilizando as duas soluções propostas, o veículo atingiu o início da rota com orientação adequada em todos os testes.

4.3.2.2 Testes de desvio de obstáculo

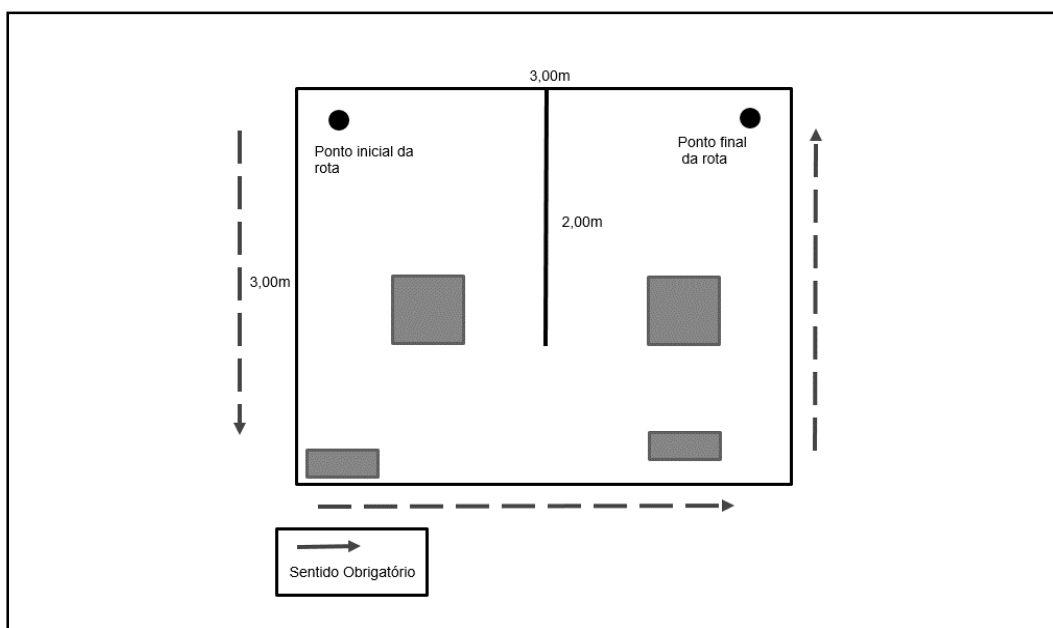
Os testes de desvio de obstáculo tiveram como objetivo determinar se o veículo consegue detectar e desviar de um determinado obstáculo no ambiente, colocando-se em uma posição adequada posterior para continuar sua navegação (Figura 32).

Figura 32: Exemplos de comportamento esperado do veículo em relação a colisão



Fonte: O Autor.

Figura 33: Configuração do ambiente para testes de colisão



Fonte: O Autor.

Para avaliação das ações da arquitetura VAT-EVA para desvio de colisão realizou-se um conjunto de testes considerando um cenário simulado de 3,00 x 3,00 metros configurado conforme a Figura 33. Neste cenário, restrições físicas de dois tipos foram inseridos na via: restrições para separação do ambiente (formando limites da via) e elementos de colisão. Não se considerou, nestes testes, a colisão com elementos dinâmicos do ambiente devido à baixa acurácia dos sensores nativos (sensores ultrassônicos e infravermelhos) da plataforma de testes.

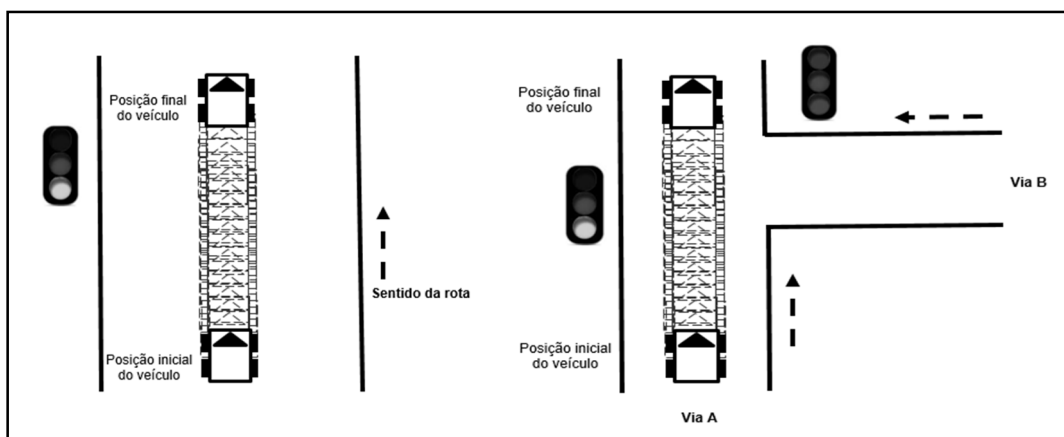
Nos testes preliminares, mesmo utilizando sensores de baixa acurácia, o veículo sempre conseguiu evitar a colisão com os limites das vias e os objetos do ambiente. A capacidade de desvio de colisão da arquitetura é dependente da velocidade com a qual se adquire os dados de colisão e a velocidade de navegação realizada. A máxima velocidade que o veículo deve realizar para garantir a segurança de sua navegação é o raio da Grade de Prioridades e, quanto mais rápido um elemento do ambiente for obtido para a Lista de Restrições, mais rápido o veículo conseguirá se movimentar no ambiente.

Considerando estes conceitos, foram realizados 11 testes específicos de desvio de colisão, sendo que o veículo atingiu o ponto final da rota proposta sem colidir em todos os casos.

4.3.2.3 Testes de cumprimento das regras de trânsito

Os testes de cumprimento de regras de trânsito tiveram como objetivo determinar se o veículo consegue reconhecer e cumprir as regras de trânsito, além de determinar o formato adequado de disponibilização destas regras. Em diversas situações, o veículo pode acessar diversas regras de trânsito, mesmo quando não se referem à sua situação de trânsito específica (Figura 34). Desta forma, o veículo deve saber quais as regras atuam especificamente sobre o seu contexto.

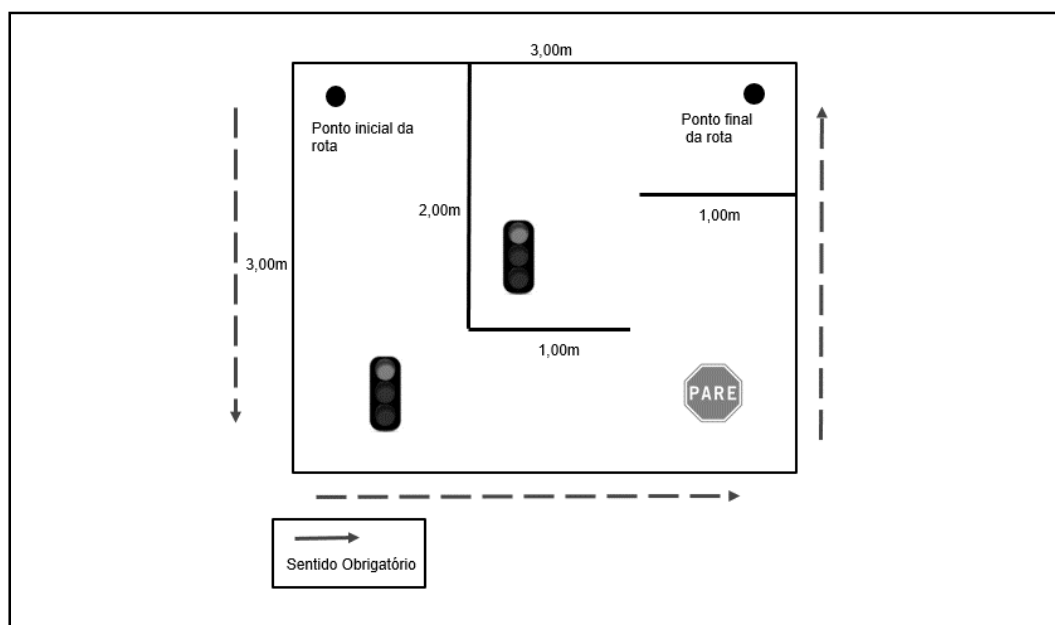
Figura 34: Exemplos de sinalização sobre um veículo



Fonte: O Autor.

Para avaliação do comportamento da arquitetura VAT-EVA para cumprimento de regras de trânsito considerou-se um cenário simulado de 3,00 x 3,00 metros, com restrições no ambiente (criando limites de via) e pontos específicos no ambiente na qual o veículo recebia regras de trânsito via comunicação (Figura 35).

Figura 35: Configuração do ambiente para testes de cumprimento de regras de trânsito



Fonte: O Autor.

Desta forma, todos os dados foram obtidos via comunicação do computador controlador e não houveram testes de reconhecimento visual ou de outro tipo de

sinalização. Esta opção foi decorrente da ausência (tanto da arquitetura como do veículo) de técnicas específicas de reconhecimento de regras de trânsito. A adoção destas técnicas, no entanto, podem impactar a qualidade do processamento das regras de trânsito por parte da arquitetura.

Os primeiros testes sobre a arquitetura consideraram a utilização das regras de trânsito sob o mesmo formato das restrições (i.e., em função de distância e orientação do veículo para regiões restritas ou liberadas no ambiente). Esta abordagem, no entanto, gerou processamento adicional já que o veículo processava todos os dados de sinalização que pudesse acessar, incluindo aqueles que não se relacionavam diretamente com sua situação de trânsito, já que não possuía recursos para determinar qual regra de trânsito se aplicava à sua situação.

Para solucionar esta deficiência, a arquitetura adota que a regra de trânsito deve ser obtida em termos das coordenadas do ambiente sobre as quais atua. Possibilita-se, assim, determinar de forma não ambígua quais regiões do ambiente uma regra de trânsito atua e a manutenção por longo prazo por parte do veículo dos dados de uma determinada regra de trânsito sem que isto interfira em seu processamento. Além disto, a conversão da diferença entre a posição do veículo e as coordenadas de atuação de uma sinalização de trânsito para variáveis de distância e orientação de restrição torna-se uma operação simples. Adotando-se estes conceitos, foram realizados 13 testes de navegação, nos quais o veículo reconheceu e atendeu as regras de trânsito em todos os casos. Considera-se que as mesmas recomendações de velocidade adotadas em relação ao desvio de obstáculos também otimizam o reconhecimento de sinalizações de trânsito.

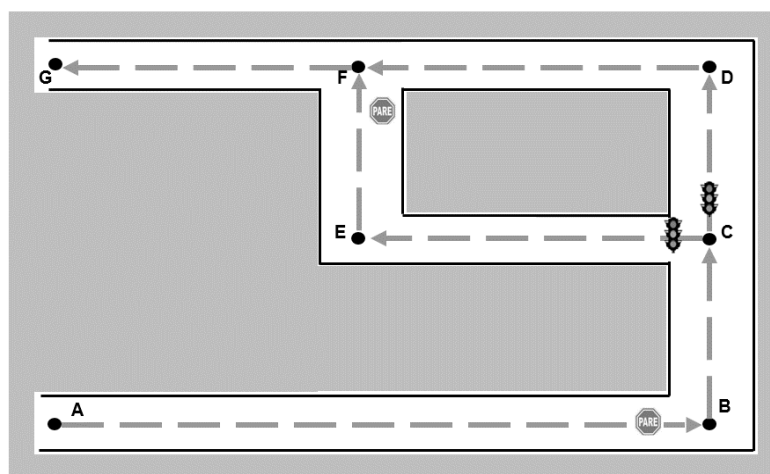
4.3.3 Testes de navegação global

Os testes de navegação global foram realizados com o objetivo de avaliar as ações de navegação anteriormente citadas de forma combinada. O comportamento analisado é limitado, pois não considera a interação com outros veículos no ambiente e a interação com os diversos elementos presentes em

uma situação de trânsito real. No entanto, a proposta dos testes globais é verificar possíveis vantagens e desvantagens nativas da arquitetura VAT-EVA e em quais situações recomenda-se o seu uso.

Para realização dos testes de navegação global, utilizou-se um sala interna do Prédio de Engenharia Civil da EPUSP, com dimensões de 13,92 x 10,05 metros, que foi configurada em um cenário típico do sistema de transportes, simulando limites da via, regras de trânsito e obstáculos. (Figura 36).

Figura 36: Configuração do ambiente de testes



Fonte: O Autor.

Os testes foram realizados através de três tipos de condução:

- a. **Navegação controlada:** condução na qual o veículo é completamente controlado pelo condutor, que define a velocidade e orientação de movimento, que são repassados ao Sistema de Tomada de Decisão. No entanto, como o Sistema de Percepção é desabilitado no nível da Grade de Prioridades, as ações propostas pelo condutor são aplicadas sem qualquer alteração significativa. Realizou-se este tipo de navegação para compreender possíveis falhas inerentes aos componentes do veículo e em seu processo de navegação, além de obter os dados que servem como parâmetros de comparação com outros tipos de testes realizados.
- b. **Navegação autônoma híbrida:** tipo de navegação que combina navegação autônoma reativa e deliberativa, sem intervenção do condutor (exceto em situações de colisão iminente, na qual o condutor pode pausar

a navegação). É inicializado com a inserção da missão por parte do condutor, realiza-se a consulta a uma base de dados para obter as rotas disponíveis e disponibiliza-se a rota ao Sistema de Mobilidade que a executa de forma contínua.

- c. **Navegação autônomo reativa:** neste tipo de navegação, o veículo não trabalha com rotas planejadas, mas apenas com as coordenadas de posição inicial e de missão, combinando-as com os dados de Percepção. O objetivo deste teste é avaliar as condições nas quais o veículo pode navegar seguramente sem a obtenção de uma rota preliminar.

De acordo com os tipos de navegação foram realizados 33 testes (Tabela 1).

Tabela 1: Testes realizados de acordo com os tipos de navegação.

	Controlado	Híbrido	Reativo	Total
Quantidade de Testes	5	14	14	33

4.3.3.1 Alcance e acurácia no cumprimento da missão

O primeiro parâmetro avaliado foi a acurácia de chegada do veículo à missão proposta, i.e., o veículo atingiu a missão estabelecida e, quando sim, (a) qual foi a distância estimada (calculado pelo sistema de navegação) entre a posição final do veículo e a missão e (b) a distância real entre a posição física do veículo e a missão proposta (medida com uma trena). Em todos os testes utilizou-se uma combinação de dados de posicionamento simulados (vinculando pontos físicos no ambiente a coordenadas conhecidas) e odometria (através da contabilização das rotações das rodas e estimativa de posição a partir de coordenadas iniciais, velocidade e direção), sendo selecionados pontos de início de navegação e de missão aleatórios que distassem, no mínimo, 1 metro.

Nos testes de navegação global realizados, o veículo atingiu sua missão em todos eles retornando ao condutor a mensagem de missão cumprida. No

entanto, dois controles tiveram de ser adotados para garantir que a navegação ocorresse de forma adequada:

- **Controle do tempo de parada:** na navegação autônoma (híbrida e reativa), o veículo pode permanecer parado mesmo que não tenha atingido a missão, quer porque há possibilidade de colisão iminente, por respeito às regras de trânsito ou por qualquer outro evento. A solução adotada foi contabilizar o tempo que o veículo não realiza nenhum movimento durante o Ciclo de Navegação e solicitar a intervenção pontual do condutor para determinar se a navegação deve continuar ou não. O sistema de navegação utilizado adota como padrão o tempo de 300 segundos (ou 5 minutos), ainda que, a qualquer tempo, o condutor possa interromper a navegação autônoma conforme sua conveniência.
- **Controle de distanciamento da missão:** em algumas navegações, o veículo pode não se aproximar de forma adequada da missão. Isto pode gerar dois eventos anômalos: (a) o veículo tentar, continuamente, atingir a missão, mas como não pode alcançá-la, inicia movimentos cíclicos que nunca atingem a missão e (b) o veículo tenta atingir a missão porém atinge um limite de distância no qual passa a se afastar progressivamente da missão. Para evitar estes erros, a arquitetura VAT-EVA mantém uma estimativa de quanto se aproxima da missão e solicita a intervenção do condutor se for verificado que a tendência é se afastar mais da missão do que se aproximar.

A Tabela 2 apresenta a distância cartesiana estimada (i.e., aquela que o sistema de navegação acreditava estar) entre a posição final do veículo e a missão estabelecida.

Tabela 2: Distância cartesiana (em metros) entre a posição final estimada pelo veículo e a missão estabelecida

	Controlado	Híbrido	Reativo	Total
Média	0,666	0,434	0,467	0,483
Erro padrão	0,025	0,054	0,058	0,036
Mediana	0,651	0,423	0,490	0,494

Desvio padrão	0,057	0,203	0,216	0,206
Mínimo	0,604	0,040	0,061	0,040
Máximo	0,746	0,740	0,782	0,782
Contagem	5	14	14	33

A Tabela 3 apresenta a distância real (medida com uma trena) entre a posição final física do veículo e a missão estabelecida.

Tabela 3: Distância cartesiana (em metros) entre a posição final real do veículo e a missão estabelecida

	Controlado	Híbrido	Reativo	Total
Média	0,351	0,434	0,462	0,433
Erro padrão	0,108	0,059	0,055	0,037
Mediana	0,281	0,486	0,469	0,485
Desvio padrão	0,241	0,222	0,207	0,215
Mínimo	0,058	0,076	0,130	0,058
Máximo	0,606	0,753	0,794	0,801
Contagem	5	14	14	33

A Tabela 4 apresenta a diferença entre os dados de posição estimada e os dados de posição real.

Tabela 4: Diferença das distâncias cartesianas estimadas e reais (em metros) entre a posição final do veículo e a missão

	Controlado	Híbrido	Reativo	Total
Média	0,315	0,211	0,111	0,185
Erro padrão	0,088	0,047	0,031	0,029
Mediana	0,323	0,153	0,097	0,127
Desvio padrão	0,197	0,174	0,118	0,168
Mínimo	0,106	0,022	0,012	0,012

Máximo	0,572	0,512	0,408	0,572
Contagem	5	14	14	33

De acordo com os resultados obtidos, ainda que não tenham sido utilizados dados de posicionamento de alta qualidade, o veículo cumpriu sua missão de forma adequada em todos os cenários propostos. Além das eficiência da arquitetura, deve-se considerar, no entanto, que os resultados foram impactados pelos seguintes fatores:

- **Os dados de posicionamento foram obtidos pelo veículo sem distorção:** como os dados de posicionamento foram recebidos pelo veículo em condições ideais de ambiente (i.e., sem ruídos), sem atrasos e em um ambiente reduzido no qual as falhas acumuladas não produziram efeitos significativos. Desta forma não houve, em nenhum momento, situação na qual o veículo estivesse com dados de posicionamento defasados ou errados o suficiente para interferir no processo de navegação. No entanto, verifica-se que a arquitetura aumenta sua qualidade para atingir a sua missão se possui sensores de posicionamento de qualidade, em especial, sensores que permitam calcular com acurácia a orientação do veículo em relação ao sistema de referência global.
- **As estruturas da Tomada de Decisão e da Grade de Prioridades permitem reduzir os erros de navegação a níveis aceitáveis:** uma preocupação inicial em relação à Grade de Prioridades é a possibilidade de perda de precisão ao ajustar-se uma orientação proposta originalmente para um valor de índice da Grade. Ainda que, em Grades de 1º por exemplo, a perda de precisão seja pequena, o acúmulo de erros poderia provocar, ao longo do tempo, erros emergentes. No entanto, como Sistema de Tomada de Decisão é organizado para corrigir o desvio em relação à rota proposta, possíveis erros pontuais são sempre corrigidos imediatamente em seguida a quando aparecem, de modo que não se acumulam e não impactam a navegação do veículo de forma global.

- **A estrutura de cenário proposto, com vias restritivas e sem grande flexibilidade de movimentação, permitiram minimizar o acúmulo de erros:** devido às limitações do ambiente de navegação, as vias de testes possuíam uma única pista, com um único sentido e na qual o veículo não necessitou concorrer com outros veículos. Desta forma, na maior parte dos casos, o veículo não tinha outra opção senão seguir em frente até alcançar sua missão. Ainda que seja uma deficiência dos tipos de testes realizados, esta abordagem pode ser adotada para construção de vias de transporte limitadas (fisicamente ou logicamente), que restrinjam as opções de ações que os VATs podem realizar em um determinado contexto. Esta abordagem permitiria reduzir o processamento embarcado (o sistema de navegação deverá lidar apenas com o espaço restrito à faixa segmentada), reduziria a possibilidade de colisão (as ultrapassagens e outras ações de risco seriam efetuadas apenas em locais permitidos e estruturados para este fim) e atingindo missões de forma mais eficiente (em espaço reduzido, é possível estabelecer de forma mais adequada a posição mais próxima da missão disponível no ambiente).

4.3.3.2 Cumprimento das regras de trânsito

O segundo parâmetro avaliado sobre execução da ação foi a verificação se o veículo atendeu às regras de trânsito convencionadas para o cenário de testes, i.e., (a) os limites de velocidade máxima das vias (o limite para todas as vias poderiam ser estabelecidos dinamicamente com um valor entre 0,2 m/s e 0,5m/s, repassados ao veículo como um dado de comunicação), (b) os sinais de parada obrigatória, (c) o sentido de navegação na via e (d) os limites reais e virtuais das vias. O caso (d) é tratado de forma mais detalhada na próxima seção. Para os outros casos, o veículo atendeu, em todas as situações, as regras de trânsito especificadas.

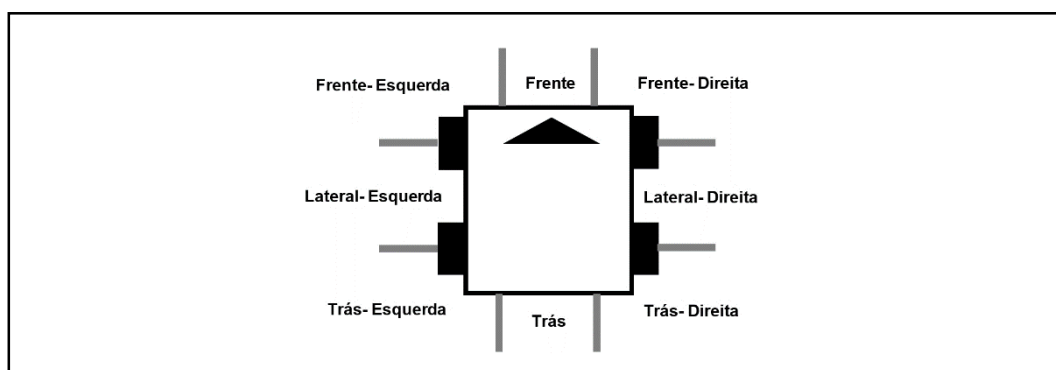
Apesar da arquitetura de navegação funcionar adequadamente quando recebe dados do ambiente conforme as situações de trânsito se apresentam, ela se

beneficia da aquisição preliminar dos possíveis dados de sinalização que devem ser esperados do ambiente (fazendo a posterior validação se tal sinalização está funcional ou não). Para isto, as regras de trânsito devem ser obtidas em termos das coordenadas sobre as quais atuam (o que permite ao veículo armazenar a longo prazo dados sobre o ambiente que não impactem em sua navegação presente), porém, devido às possibilidades do veículo não adquirir sua posição de forma acurada, a cobertura de uma regra de trânsito deve possuir uma margem de erro para atuação por parte do veículo.

4.3.3.3 Desvio de colisão

A avaliação de desvio de colisão teve como objetivo analisar se, nos testes realizados de navegação, o veículo atendeu as rotas propostas de forma segura, sem colidir com elementos no ambiente (colisão) e respeitando a legislação de trânsito. Para realização dos testes foram considerados dois tipos de colisão: (a) colisões físicas (elementos reais no ambiente tais como paredes, caixas e outros objetos) e (b) colisões virtuais (limites da via repassados como regras de trânsito via comunicação). Todas as colisões que ocorreram nos testes foram anotadas em relação à estrutura do veículo (Figura 37).

Figura 37: Regiões da estrutura do veículo



Fonte: O Autor.

A quantidade de colisões por cada região da estrutura do veículo é dada pela Tabela 5.

Tabela 5: Quantidade de colisões por regiões do veículo

Colisões Reais	Tipo de Navegação		
	Controlado	Híbrido	Reativo
Frente	4	9	10
Frente - Esquerda	3	4	8
Frente - Direta	1	8	5
Lateral - Esquerda	0	7	4
Lateral - Direita	3	6	4
Atrás	2	7	7
Atrás - Direita	3	6	10
Atrás-Esquerda	2	3	7
Total	18	50	55

Colisões Virtuais	Tipo de Navegação		
	Controlado	Híbrido	Reativo
Frente	1	5	10
Frente - Esquerda	1	8	10
Frente - Direta	1	8	6
Lateral - Esquerda	3	6	10
Lateral - Direita	3	10	7
Atrás	1	6	6
Atrás - Direita	2	9	7
Atrás - Esquerda	2	5	5
Total	14	57	61

A Tabela 6 apresenta os motivos de colisão e se foi necessária a intervenção humana posterior para fazer o veículo retornar à sua navegação normal.

Tabela 6: Motivo de colisão e necessidade de intervenção

Motivos de Colisão	Controlado	Híbrido	Reativo
Falha dos componentes do veículo	1	5	4
Movimento do veículo	13	11	13
Não-cobertura dos sensores	0	22	33
Falha de navegação	18	32	32
Atraso na percepção do ambiente	0	33	29
Não determinado	0	4	5
Total de Colisões	32	107	116

Necessidade de Intervenção Humana	Controlado	Híbrido	Reativo
Sim	32 (100%)	36 (34%)	23 (20%)
Não	0 (0%)	71 (66%)	93 (80%)

Os motivos de colisão foram classificados em:

- **Falhas inerentes à plataforma robótica:** colisões provocadas por não funcionamento ou comportamento anômalo de algum componente da

plataforma robótica e não do sistema de navegação. Em especial, a principal falha da plataforma robótica foi o não funcionamento de sensores de colisão em um determinado intervalo de tempo. A arquitetura proposta não consegue lidar diretamente com estes problemas (pelo que sempre demandaram intervenção humana nestes erros) ainda que falhas de componentes possam ser corrigidas pela adoção de práticas de manutenção e calibração adequados, assim como uso de sensores de melhor qualidade.

- **Movimento do veículo:** colisões provocadas pelo comportamento dinâmico do veículo ao realizar seu movimento. Desta forma, pela arquitetura proposta, ainda que a parte dianteira do veículo realize seu movimento adequadamente, as forças físicas fazem com que parte da estrutura do veículo colidam com partes do ambiente. Estas colisões podem ser tratadas pela adoção de modelos do veículo que tratem as variáveis que podem interferir no comportamento do veículo ao longo do tempo.
- **Não cobertura dos sensores:** colisões provocadas pela ausência de medição de sensores sobre regiões do ambiente ou pelo atraso de leitura dos sensores (não provocado pelo sistema de percepção). Com o aumento da cobertura das regiões adjacentes do veículo e aumento da qualidade dos sensores, estas colisões tendem a ser reduzidas.
- **Não determinado:** casos nos quais não foi possível determinar o motivo de colisão.

Outros dois motivos de colisão com especial consideração foram o atraso na percepção do ambiente e falhas de navegação. Estes motivos são analisados mais detalhadamente nas próximas seções.

4.3.3.4 Análise do processamento da Tomada de Decisão

A análise do processamento da Tomada de Decisão avaliou a velocidade de processamento, a integridade dos dados, o consumo de memória e a complexidade dos algoritmos envolvidos na construção da Grade de Prioridades

(desde a aquisição dos dados do Conjunto de Dados até a geração da ação final a ser repassada aos atuadores).

Os dados de velocidade de processamento obtidos nos testes são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Velocidade (em segundos) da geração de ação a partir da Grade de Prioridades

	Controlado	Híbrido	Reativo	Total
Média	0,551	0,646	0,743	0,679
Erro padrão	0,004	0,003	0,003	0,002
Mediana	0,551	0,644	0,742	0,675
Desvio padrão	0,318	0,377	0,376	0,376
Mínimo	0,001	0,000	0,000	0,000
Máximo	1,100	1,300	1,400	1,400
Contagem	5460	17109	20016	42585

A Tabela 8 apresenta o tempo médio de processamento apresentada por cada conjunto de medições consideradas para composição da Grade de Prioridades.

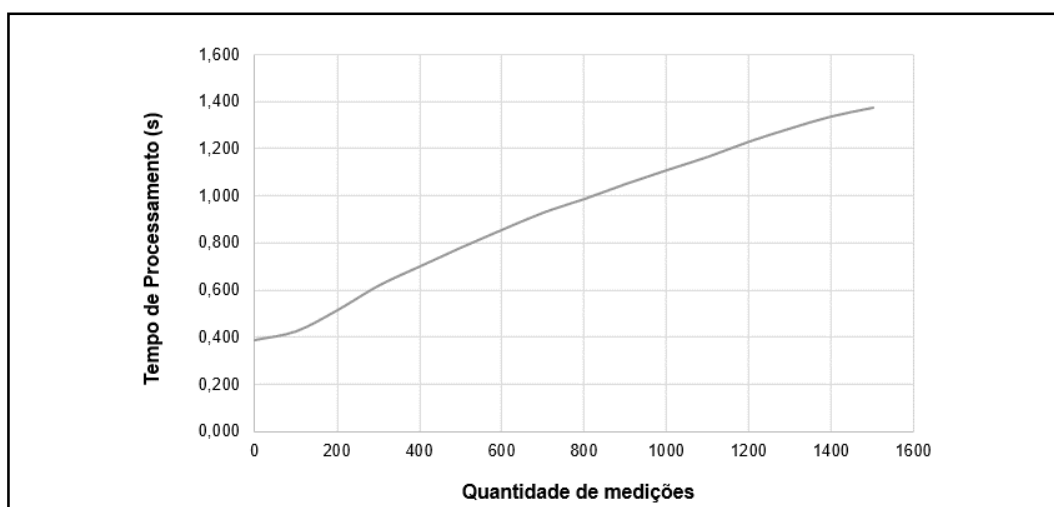
Tabela 8: Tempo médio de processamento (em segundos) da Grade de Prioridades de acordo com a quantidade de medições de entrada

Quantidade de medições	Tempo médio de Processamento
0 F 99	0,386
100 F 199	0,423
200 F 299	0,513
300 F 399	0,617
400 F 499	0,699
500 F 599	0,779
600 F 699	0,855
700 F 799	0,928

800 F 899	0,986
900 F 999	1,050
1000 F 1099	1,109
1100 F 1199	1,166
1200 F 1299	1,231
1300 F 1399	1,287
1400 F 1499	1,338
1500 F 1599	1,375
Total	0,679

Considerando-se que as ações do veículo são requisitadas ao menos com a frequência de 1Hz, de acordo com os dados obtidos nas Tabelas 7 e 8, é possível determinar que o veículo tomou decisões dentro de um tempo aceitável. Em todos os testes de navegação realizados, o Ciclo de Navegação sempre contou com uma ação apropriada a ser executada sobre o ambiente, de forma que não houveram erros, neste sentido, nas contínuas operações sobre a Grade. Uma limitação detectada, no entanto, no processo de Tomada de Decisão é que a velocidade de processamento é dependente da quantidade de dados de entrada (Figura 38).

Figura 38: Quantidade de medições e tempo de processamento da Grade de Prioridades



Fonte: O Autor.

Ainda que, com o incremento dos recursos de processamento, o tempo demandado pelo processamento possa ser reduzido, o aumento da quantidade de medições utilizados para o processo de Tomada de Decisão pode, dependendo dos recursos computacionais utilizados, tornar inviável o uso do processo, especialmente se for aplicado em um ambiente de trânsito real. Esta limitação é dependente do modelo de criação da Grade proposto já que as medições são consideradas linearmente sobre a Grade (i.e., elas são avaliadas uma a uma para composição da Grade), realizando operações de busca da região associada, comparações de valor, marca temporal e prioridade e atualização dos dados quando conveniente.

Para tornar o processo consistente para um número independente de medições, alguns ajustes podem ser realizados:

- a. **Adoção de paralelismo na criação da Grade de Prioridades:** para minimizar os efeitos da linearidade das operações, um procedimento possível é agrupar as regiões da Grade em blocos operacionais, sobre os quais são executadas operações paralelas de atualização. Desta forma, a linearidade ocorre ao nível do bloco e não da Grade como um todo.
- b. **Adoção de restrições de tempo para Tomada de Decisão:** a adoção de limites de tempo para as operações sobre a Grade não são recomendadas devido a possibilidade de perda de precisão sobre os dados do ambiente. No entanto, em situações práticas, medições de baixa prioridade podem ter limites de tempo para sua execução, sendo descartadas se não atenderem a um limite de tempo pré-estabelecido.
- c. **Adoção de reações reativas pontuais a situações de alta urgência:** a Grade de Prioridades busca atender a qualquer situação de trânsito, mas pode ser ineficiente para tratar eventos que ocorram mais rápido do que o processo de percepção e a criação da Grade combinados. Desta forma, ações reativas pontuais em situações determinadas pelo veículo como sendo de extrema urgência podem ser realizadas, deixando-se à Grade a Tomada de Decisão em um nível mais global.

4.3.3.5 Análise do processamento de Percepção

A análise sobre o Processo de Percepção avaliou a velocidade de processamento, a integridade dos dados, o consumo de memória e a complexidade dos algoritmos envolvidos na aquisição de medições, algoritmos de transformação e armazenamento nos conjuntos de dados da arquitetura.

Qualquer avaliação completa do Processo de Percepção é dependente do equipamento computacional e dos sensores utilizados para realizar a navegação. Para estes testes, no entanto, buscou-se avaliar o comportamento do Processo de Percepção, independentemente destes elementos. Para isto, descartou-se processamento local de sensores e outras variáveis semelhantes e considerou-se para testes o intervalo entre a obtenção de uma medição por uma das interfaces de entrada de dados do sistema de percepção até sua disponibilidade nos conjuntos de dados. A avaliação da Percepção, para este tipo de teste, independe do tipo de condução realizada (já que Percepção é utilizada em todos os tipos de navegação, sendo, no entanto, desabilitada na Grade de Prioridades na navegação controlada), porém as colisões decorrentes da Percepção ocorrem apenas na navegação reativa e híbrida.

A Tabela 9 apresenta o comportamento da Percepção e dos seus subprocessos nos testes realizados.

Tabela 9: Velocidade (em segundos) do Processo de Percepção e dos seus subprocessos

	Restrição	Posição	Comunicação	Total
Média	0,49	0,28	0,31	1,08
Erro padrão	0,00	0,00	0,00	0,00
Mediana	0,37	0,17	0,08	0,79
Desvio padrão	0,43	0,28	0,47	0,89
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	1,94	1,86	2,00	4,33
Contagem	56021	56021	56021	56021

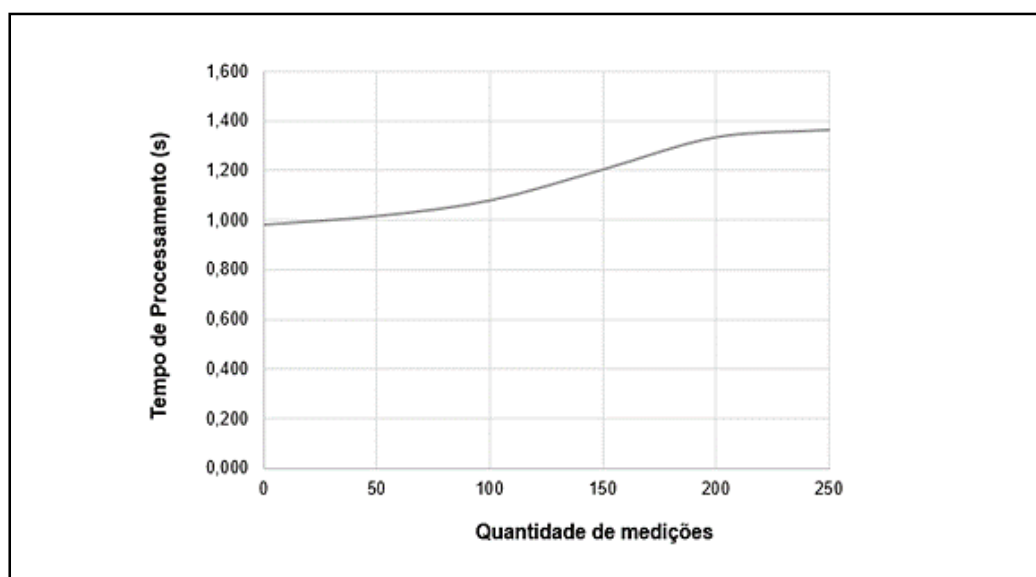
Em todos os testes de navegação realizados, a Percepção realizou todas as transformações internas, sem perda de dados e não houve intervalo de tempo no qual o processo de percepção não estivesse em atividade, desde o momento de inicialização até o momento de encerramento do sistema do veículo. Das medições obtidas, no entanto, 1879 foram consideradas inválidas (3,35% do total): estes dados inválidos são dados gerados pelo sistema de forma padronizada (já que o sistema garante que uma vez solicitado uma medição de um sensor ou de um subsistema, obrigatoriamente o dado transformado vinculado deverá ser gerado) para substituir dados de sensores que estavam inacessíveis em um intervalo de tempo ou que não retornaram dados em um tempo aceitável. Para efeito de testes, estes dados não foram descartados, mas foram utilizados para avaliação do comportamento do sistema.

Considerando os Ciclos de Percepção realizados em todos os testes, 61% deles (34032 ciclos) foram realizados abaixo do limite de tempo estipulado de 1 Hz, enquanto 39% (21989 ciclos) foram realizados acima deste limite. Os ciclos acima do limite recomendado, no entanto, não impactaram diretamente a Tomada de Decisão, já que o atraso é corrigido pelo sistema de previsão de dados de restrição e posicionamento, permitindo ao veículo sempre manter dados atualizados e dentro da faixa de tempo adequada para tomar as suas decisões de forma contínua, pelo menos em relação aos elementos de restrição do ambiente.

A principal limitação detectada do Sistema de Percepção desenvolvido pelo sistema de navegação é o fato de ser realizado em uma estrutura linear: a aquisição e transformação de dados dos sensores, assim como a Grade de Prioridades, também é realizada de forma linear: para cada medição, realizam-se todas as transformações pertinentes e, até seu armazenamento nos conjuntos de dados de sistema, o sistema de Percepção é bloqueado para operação de outros dados. A Tabela 10 e a Figura 39 apresentam o tempo médio de processamento das medições de acordo com a quantidade de dados de entrada.

Tabela 10: Tempo médio de processamento por intervalo de medições

Quantidade de medições	Tempo médio de Processamento
0 F 49	0,981
50 F 99	1,015
100 F 149	1,079
150 F 199	1,204
200 F 249	1,335
249 F 299	1,364
Total	0,679

Figura 39: Relação entre a quantidade de medições de entrada e o tempo de processamento do Sistema de Percepção

Fonte: O Autor.

Pela natureza independente de cada tipo de medição (que não depende de outras medições para suas operações, exceto aquelas de previsão de restrição), algumas recomendações apresentadas para a Tomada de Decisão podem também ser aplicadas neste caso: (a) a paralelização de cada subsistema de Percepção, de modo a adquirir maior volume de medições para um mesmo intervalo de tempo e (b) a adoção de limites de tempo para a manipulação global e individual das medições. Além disto, a utilização de dados já preliminarmente formatados e adequados (por exemplo, pelo sistema de transportes) pode

permitir a redução do tempo e processamento de atividades de aquisição de dados e transformações de Percepção.

4.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de um sistema de navegação no formato de *software* baseado na arquitetura VAT-EVA. Os subsistemas da arquitetura e seus conjuntos de dados são implementados em forma de componentes do sistema de navegação ao qual, para ser funcional e completo, também são adicionados novos componentes (configurações, *logging*, recuperação e comunicação) que não fazem parte da arquitetura original.

No sistema de navegação proposto, a Grade de Prioridades é desenvolvida através da adoção de uma matriz computacional segmentada em três vetores: (a) um vetor armazena dados sobre a distância livre, (b) outro vetor armazena os dados de prioridade e, ainda, (c) outro vetor armazena os dados de marcação de tempo. Cada posição de um vetor está diretamente vinculada à mesma posição de outros vetores e os cálculos das Regiões de Agrupamento é realizada pelo agrupamento de posições e busca simples.

Para validação e testes, o sistema de navegação foi integrado a uma plataforma robótica chamada Robodeck, a qual combina diversas tecnologias de sensores e atuadores nativos para pesquisas na área da Robótica, permitindo, também, a adição de novas tecnologias conforme a conveniência. Apesar da plataforma não apresentar todos os recursos necessários a um veículo autônomo real, ela tem sido utilizada como um modelo de testes de navegação autônoma pela EVA-EPUSP.

Para avaliação da arquitetura e do sistema de navegação propostos foi realizado um conjunto de testes, simulando as principais situações de trânsito que devem ser tratadas por um VAT. Estas situações foram analisadas individualmente e em conjunto em uma navegação completa, sendo elas: (a) ações para entrar na rota de navegação – capacidade do veículo iniciar uma rota proposta – (b) ações de desvio de possíveis obstáculos – capacidade do veículo desviar de elementos do ambiente e manter sua rota de forma segura e (c) ações de cumprimento da

legislação de trânsito – capacidade do veículo cumprir as regras de velocidade, restrição e liberação de espaço do ambiente determinadas preliminarmente.

Em todas os testes específicos, o veículo atendeu adequadamente a navegação robótica desde que certas condições fossem cumpridas: entre as principais, a arquitetura exige sensores ou mecanismos adequados de orientação para posicionar-se em direção a rota e conectar sua posição inicial ao início de uma rota adquirida, assim como para garantir uma rápida obtenção de dados do ambiente para realização de movimentos mais rápidos e adequados ao contexto de navegação. Além disto é recomendado que, para tratamento por parte do veículo, regras de trânsito e restrições do ambiente que possam ser adquiridas preliminarmente sejam tratadas sob a forma de coordenadas, o que permite um processamento mais refinado e o armazenamento de dados no sistema a longo prazo.

Os testes de navegação global foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento das atividades de navegação de forma combinada durante todo o processo de navegação, desde o momento da inserção da missão e escolha do tipo de navegação, até a conseqüente chegada à missão proposta. Para realização de testes foram feitas navegações completas baseadas em três tipos de condução: (a) navegação controlada – realizada por um condutor humano, (b) navegação autônoma híbrida – combinando dados de planejamento e de sensoriamento para realizar a navegação e (c) navegação autônoma reativa – utilizando apenas dados de sensoriamento do veículo. Para cada navegação foi avaliada a (a) capacidade do veículo atingir com acurácia a missão proposta (com uma distância mínima de um metro), (b) verificação se o veículo atingiu as regras de trânsito convencionadas (limites de velocidade, sinais de parada obrigatória, limites da via e sentido de navegação).

O veículo atingiu a missão proposta em todos os testes realizados, mesmo com os dados de posicionamento tendo sido obtidos de forma inacurada e simulada. Recomenda-se, no entanto, a adoção de técnicas de controle de tempo de parada e do distanciamento da missão com o intuito de tornar a navegação efetivamente funcional.

Quanto às regras de trânsito impostas no cenário de navegação, o veículo atendeu adequadamente a todas as regras, excetuando aquelas relacionadas a

segurança de navegação. Nos testes realizados, o veículo realizou diversas colisões devido às limitações de aquisição de dados e cobertura dos sensores utilizados. Neste caso, para tornar a arquitetura plenamente adequada, torna-se necessário prover o veículo de uma cobertura completa das suas regiões adjacentes com sensores de longo alcance e alta qualidade.

Em termos de processamento, ainda que velocidades específicas sejam dependentes do *hardware* e dos recursos associados à linguagem de programação utilizada, dentro dos testes o veículo tomou decisões em tempo aceitável e a percepção do ambiente foi obtida em uma frequência preliminarmente adequada. Verificou-se, no entanto, que tanto o sistema de percepção quanto o sistema de tomada de decisão, por funcionar de forma linear (i.e., as ações são realizadas de forma encadeada), o aumento da quantidade de dados impacta os processos desenvolvidos nos dois sistemas. Para tornar os processos consistentes e funcionais para um número independente de medições, alguns ajustes podem ser realizados (a) adoção de paralelismo na criação da Grade de Prioridades, (b) adoção de restrições de tempo para tomada de decisão e (c) adoção de reações reativas pontuais a situações de alta urgência.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

“It is those who know little, and not those who know much, who so positively assert that this or that problem will never be solved by science.”

Charles Darwin , *The Descent of Man* (1871)

Esta pesquisa apresentou contribuições originais para navegação autônoma, ao propor uma arquitetura de Tomada de Decisão que modela os eventos que ocorrem em uma situação de trânsito. Os principais fundamentos da arquitetura proposta são (a) a organização dos eventos de trânsito em níveis de prioridade e (b) a proposta de desenvolvimento de uma estrutura de dados específica chamada Grade de Prioridades que permite definir qual ação deve ser executada em uma determinada situação de trânsito. Os resultados obtidos dos testes realizados demonstraram que a arquitetura possui a capacidade de gerenciar a navegação autônoma na maior parte das situações de trânsito, ainda que eventos mais refinados (tais como estacionamento veicular, resposta à colisão inesperada e interação com múltiplos veículos), necessitem da integração de técnicas específicas para serem adequadamente tratados.

A organização dos eventos do sistema de trânsito em níveis de prioridade propostas por este trabalho permite que o sistema de navegação autônoma estruture de forma lógica os dados do ambiente e priorize adequadamente as ações a serem realizadas. A legislação de trânsito é, em geral, resultado de decisões técnicas e políticas, gerando leis que podem não ser adequadas para tratamento por parte de veículos inteligentes e VATs. Além disto, a legislação de trânsito em diversos países, como o Brasil, não é aplicada de maneira uniforme mas varia de acordo com os diferentes níveis de administração (federal, estadual ou municipal)¹². A adoção de níveis de prioridade possibilita o desenvolvimento de um vocabulário padronizado através do qual diferentes implementações da legislação de trânsito podem converter suas instruções em um formato único e compreensível para um mesmo veículo.

¹² Exemplos de implementações específicas da legislação de trânsito envolvem a adoção de sistemas de rodízios de veículos baseados na combinação entre numeração de placas e dias da semana e segmentação de parte de uma via para veículos específicos (por exemplo, ônibus).

A arquitetura proposta também desenvolve um modelo simplificado em termos computacionais, neutro e padronizado de tratamento de dados que pode ser utilizado de forma completa ou parcial para gerenciar qualquer tipo de veículo em diferentes contextos do sistema de trânsito. O modelo fornece uma estrutura adequada para implementação de técnicas de navegação autônoma como comboios e comunicação entre veículos. Veículos de diferentes tipos, mesmo aqueles que não podem atender a navegação autônoma de forma absoluta por necessitar transgredir, por vezes, as normas de trânsito (por exemplo, ambulâncias, carros policiais, veículos militares, veículos de autoridades governamentais, entre outros) também podem ser suportados pelo sistema.

A arquitetura proposta, no entanto, possui algumas limitações que podem exigir atualizações e correções para desenvolvimentos mais específicos:

- **Definição da quantidade de sensores e da qualidade necessária para operação (em especial, sensores de restrição e posicionamento):** a arquitetura VAT-EVA é construída para suportar qualquer quantidade de sensores, independente das tecnologias e qualidades oferecidas. No entanto, os principais testes realizados foram validados com sensores nativos da plataforma robótica de testes e dados de simulação para situações nas quais não se dispunha de sensores adequados para sensoriamento. Considera-se que a utilização de um maior número de sensores com melhor qualidade para detecção de colisão (que forneçam uma cobertura completa sem “pontos-cegos” do ambiente e, se possível, com distância adequada de aquisição) e posicionamento (utilizando técnicas como GPS Diferencial, por exemplo) possam tornar o processo de navegação mais otimizado. Pesquisas associadas a este tópico, dentro do contexto desta pesquisa, incluem o uso de GPS para posicionamento em navegação robótica (GONÇALVES, 2011), visão computacional (ORLANDINI, 2013) e uso de sistemas inerciais (MORI, 2013).
- **Testes em vias com níveis de elevação diferenciados:** a arquitetura VAT-EVA foi construída para ser utilizada em qualquer tipo de navegação, porém suas estruturas de dados são trabalhadas de forma bidimensional, fornecendo ações de velocidade e orientação sem considerar a variação da superfície de navegação. O refinamento de ações para interagir com

níveis de elevação pode ser realizado ao nível dos atuadores que, ao receberem dados da arquitetura VAT-EVA, podem aplicar as ações adequadas de força e velocidade de movimento, ou pode ser realizado pela adoção de um sistema específico que receba os dados do sistema de tomada de decisão e realize as operações necessárias antes de entregar as ações aos atuadores.

- **Necessidade de ações reativas pontuais a situações de alta urgência:** ainda que a arquitetura busque atender a qualquer situação de trânsito, ela pode ser ineficiente para tratar eventos que ocorram mais rápido do que os processos de percepção e mobilidade combinados. Desta forma, ações reativas pontuais em situações determinadas pelo veículo como sendo de elevada urgência podem ser realizadas ao nível dos atuadores, deixando-se à Grade a Tomada de Decisão em um nível mais global. Esta solução, no entanto, pode trazer comportamentos inesperados emergentes nos casos nos quais o veículo tenha de realizar diversas reações pontuais.
- **Adoção de paralelismo e restrição de tempo nos processos de sistema:** ainda que a recomendação da arquitetura seja a de que o Ciclo de Percepção e o Ciclo de Navegação sejam executados de forma paralela, componentes como o Sistema de Percepção e a Grade de Prioridades são, internamente estruturados de forma linear (isto, é o sistema obtém o primeiro dado, realiza o processamento, obtém o segundo dado, realiza o processamento e assim consecutivamente). Para uma grande quantidade de dados, o efeito de linearidade podem tornar o sistema mais lento. Uma primeira correção possível é segmentar estes processos em blocos operacionais que funcionem de forma concorrente: desta forma, por exemplo, os subsistemas de Percepção (Restrição, Posicionamento e Comunicação) podem ser concorrentes. No caso da Grade de Prioridades, os setores da Grade podem ser agrupados em blocos atualizáveis de forma paralela. Uma segunda correção é adotar limites de tempo para realização de operações da arquitetura: ainda que restrições de tempo sobre a Grade não sejam recomendadas (devido a possibilidade de perda de precisão sobre os dados do ambiente), em

situações práticas, medições de baixa prioridade podem ter limites de tempo para sua execução, sendo descartadas se não atendem a um limite de tempo pré-estabelecido.

Entre os principais trabalhos futuros que podem tomar esta pesquisa como base incluem-se:

- **Utilização da arquitetura VAT-EVA como sistema de ADAS:** ainda que a arquitetura proposta seja considerada para construção de um sistema de navegação para um VAT, a mesma arquitetura pode ser utilizada para construção de um sistema de suporte à tomada de decisão por parte do condutor em veículos inteligentes. Nesta abordagem, ao invés de estar associado aos atuadores do veículo, a arquitetura deve estar integrada a um sistema que permita fornecer ao condutor informações visuais, sonoras, etc. sobre qual a melhor ação a ser executada em um determinado contexto.
- **Utilização para construção de outros modelos de veículos robóticos:** apesar do modelo VAT-EVA ser orientado para uso com o sistema de trânsito, sua estrutura de tomada de decisão baseada em prioridades pode ser trabalhada para atender outros modelos de veículos que não sejam VATs, tais como robôs de exploração e veículos em outros meios de transporte (como aéreos e marítimos). Nestes casos, no entanto, pode ser necessário modificar a tabela de prioridades para atender as prioridades conforme a conveniência.
- **Utilização com múltiplos veículos:** a arquitetura VAT-EVA foi testada e funcionou adequadamente com um único veículo, não sendo adotado um sistema de comunicação entre veículos o que permitiria tornar a navegação ainda mais inteligente. Para atender ao sistema de transportes de forma completa, a arquitetura também deve ser avaliada em múltiplos veículos que necessitam compartilhar os mesmos recursos do ambiente. Exemplos de técnicas incorporando múltiplos veículos podem ser de fácil conversão para a Grade de Prioridades. Comboios lógicos (como as autoestradas de trem), por exemplo, devem considerar que o veículo-guia realizará as decisões conforme propostas nesta pesquisa e os veículos a

serem guiados terão como rota de planejamento seguir o veículo-guia. Acordos para sinalização e não colisão entre veículos podem ser realizados pela integração entre as Grades de Prioridades específicas, restringindo-se e liberando-se os setores da Grade através de acordos lógicos.

- **Utilização do modelo VAT-EVA para veículos em vias segmentadas:** veículos que necessitam estar em vias específicas separadas de outros tipos de veículos (por exemplo, ônibus em algumas cidades) podem usar a arquitetura VAT-EVA. Nestes casos, estabelecem-se os limites das vias (por exemplo, através de marcas no solo ou obstáculos no ambiente) de forma a permitir o sensoriamento por parte do veículo (que irá projetar esta limitação sobre sua Grade) e as condições (baseadas no Modelo do Veículo) que estabelecem quais veículos podem operar na via.
- **Definir um modelo de infraestrutura inteligente de transportes:** nesta pesquisa avaliou-se a utilização do VAT considerando processamentos externos de auxílio, como por exemplo, o planejamento de rota e simulando a comunicação através do dispositivo de controle. Estes processamentos, em um ambiente real, devem ser fornecidos pela infraestrutura de transportes que, em um cenário ideal, deve fornecer dados atualizados aos atores do sistema de transportes, possuindo seu próprio modelo de tomada de decisão e integração de forma a gerenciar autonomamente a mobilidade urbana.

REFERÊNCIAS

- BENENSON, R. **Perception pour véhicule urbain sans conducteur: Conception et implementation.** 2008. Tese (Doutorado) - École des Mines de Paris. Paris: Paris Tech, 2008.
- BERNSTEIN, D.; KORNHAUSER, A. **An Introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants.** Newark: New Jersey TIDE Center, 1996.
- BERRY, C.A. **Mobile Robotics for Multidisciplinary Studies.** San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2012.
- BIPM. **The International System of Units (SI).** 8 ed. 2006.
- BLITZKOW, D. *et al.* O conceito atual dos referenciais usados em Geodesia. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.63/5, p.633-648, Nov. 2011.
- BUSCHKA, P.; SAFFIOTTI, R. Some notes on the use of hybrid maps for mobile robots. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT AUTONOMOUS SYSTEMS (IAS),8., Amsterdam, 2004. **Proceedings...** Amsterdam, 2004.p. 547-556.
- BORENSTEIN, J.; EVERETT, H.R.; FENG, L. **Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning.** Ann Arbor: University of Michigan, 1996.
- BORENSTEIN, J. *et al.* Mobile Robot Positioning - Sensors and Techniques. **Journal of Robotic Systems**, v.14, n.4, p. 231- 249, 1997.
- 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.
- BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro (CTB). Brasília, DF: Casa Civil, 1997.
- BROGGI, A. *et al.* **Automatic Vehicle Guidance: The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle.** Singapore: World Scientific Publishing, 1999.
- BROWN, L.; EDWARDS, D. Vehicle Modelling. In: BEVLY, D.M.; COBB,S. **GNSS for vehicle control.** Norwood, Artech House, 2010. p.61-90.
- BURGARD, W. *et al.* Integrating Global Position Estimation and Position Tracking for Mobile Robots:The Dynamic Markov Localization Approach. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS'98), 1998, Victoria. **Proceedings...**Victoria, 1998. p. 730-735.
- CHOSSET, H. *et al.* **Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms and Implementation.** Cambridge: MIT Press, 2005.
- COBB, S.; CLARK, B. GNSS and Other Navigation Sensors. In: BEVLY, D.M.; COBB,S. **GNSS for vehicle control.** Norwood: Artech House, 2010. p.1-37.

COLLINS, T.; COLLINS, J.J.; RYANS, C. Occupancy Grid Mapping: An Empirical Evaluation. In: MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL & AUTOMATION (MED'07), 15., 2007, Atenas. **Proceedings...** Atenas, p.1-6, 2007.

CUNY, X.; CHAUVIN, C. Decision-making in controlling development of driving/piloting situation. **Safety Science**, n.47, p. 1201-1204, 2009.

DÁVILA, A.; NOMBELA, M. SARTRE: Safe Road Trains for the Environment. In: CONFERENCE ON PERSONAL RAPID TRANSIT PRT@LHR, 2010, London. **Proceedings...** 2010.

DICKMANN, E.D. *et al.* The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. In: INTELLIGENT VEHICLES '94 SYMPOSIUM, 1994, Paris. **Proceedings...** Paris, 1994. p.68-73.

DUDEK, G.; JENKIN, M. **Computational Principles of Mobile Robots**. New York: Cambridge University Press, 2010.

DURRANT-WHYTE, H. **A Critical Review of the State-of-the-Art in Autonomous Land Vehicle Systems and Technology**. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2001.

ESPG. Coordinates Conversions and Transformations including Formulas. **ESPG Guidance Note**. n. 7, part 2, 2013.

FASTENMEIER, W.; GSTALTER, H. Driving task analysis as a tool in traffic Safety research and practice. **Safety Science**, n. 45, p. 952–979, 2007.

FILLIAT, D.; MEYER, J. Map-Based Navigation in Mobile Robots: I. A Review of Localization Strategies. **Cognitive Systems Research**, v.4, n.4, p.243–282, 2003.

GAGE, D.W. UGV History 101: A Brief History of Unmanned Ground Vehicle (UGV) Development Efforts. **Unmanned Systems Magazine**, v.13, n.3, p.9 - 32, 1995.

GEDDES, N.B. **Magic Motorways**. New York: Random House Book, 1940.

GHOSH, S.; LEE, T.S. **Intelligent Transportation Systems: Smart and Infrastructure Design**. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

GREEN, M. How Long Does It Take to Stop? Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. **Transportation Human Factors**, v.2, n.3, p.195-216, 2000.

GONÇALVES, L. F. S. **Desenvolvimento de Navegação Autônoma por GNSS**. 2011. 192 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GUIZZO, E. How Google's Self-Driving Car Works. **IEEE Spectrum**: 18 Oct. 2011. Disponível em <<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial->

intelligence/how-google-self-driving-car-works>. Último acesso em 01 de Abril de 2014.

HODO, D.W. GNSS Control of Ground Vehicles. In: BEVLY, D.M.; COBB,S. **GNSS for vehicle control**. Norwood: Artech House, 2010. p.175-212.

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.

KONOLIGE, K. Improved occupancy grids for map building. **Autonomous Robots**, n. 4, p. 351–367,1997.

LIFE. Life Goes To The Futurama. **Life**. 5 Jul. 1939.

LUTZENBERGER, M.; ALBAYRAK,S. Can You Simulate Traffic Psychology ? An Analysis. In: SIMULATION CONFERENCE (WSC), 2013 WINTER, Washington, 2013. **Proceedings...** Washington, 2013. p.1539-1550.

MATTHIES, L.; ELFES, A. Integration of sonar and stereo range data using a grid-based representation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, Philadelphia, 1988. **Proceedings...** v.2, 1988. p.727-733.

MEYER, J.-A.; FILLIAT, D. Map-based navigation in mobile robots II: A review of map-learning and path-planning strategies. **Cognitive Systems Research**, v.4, n.4, p.283–317, 2003.

MICHON, J.A. A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do ? In: EVANS,L.; SCHWING, R.C. **Human behavior and traffic safety**, New York: Plenum Press, p. 485-520, 1985.

MILLER, K.M. Caribbean datums and the integration of geographical data. **Caribbean Journal of Earth Science**, n. 37, p.1-10, 2003.

MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2007.

MORAVEC, H.; ELFES, A. High Resolution Maps from Wide Angular Sensors. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1985, St. Louis. **Proceedings...**, 1985. p. 116–121.

MORI, A. M. **O uso do sistema inercial para apoiar a navegação autônoma**. 2013. 179 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MORITZ, H. Geodetic Reference System 1980. **Journal of Geodesy**, v.74. n.1, p.128-133, 2000.

MULLER, J. With Driverless Cars, Once Again It Is California Leading The Way. 26 Sep.2012. **Forbes**. Disponível em <<http://www.forbes.com/sites/joannmuller/>

2012/09/26/with-driverless-cars-once-again-it-is-california-leading-the-way/>. Último acesso em 01 de Abril de 2014.

MUÑOZ, S. M. **Projeto do software do RoboDeck**. Versão 0.2. São Carlos: XBOT, 2011.

MUTTART, J. W.. Evaluation of the influence of several variables upon driver perception response times. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE INSTITUTE OF TRAFFIC ACCIDENT INVESTIGATORS, 5.,2001, York. **Proceedings...** York, 2001.p. 116–129.

NHTSA. **Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles**. Publication NHTSA 14-13. National Highway Traffic Safety Administration, Washington DC, May 2013.

NILSSON, N.J. A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques. In: FIRST INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 1969, Washington. **Proceedings....** Washington, 1969. p. 509-520.

NILSSON, N.J. **Shakey The Robot**. Technical Note 323 AI Center. Menlo Park: SRI International, 1984.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Trad. Heloisa Coimbra de Souza; revisor técnico Eduardo Aoun Tannuri. 5.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLSON, P.L.; FARBER,G. **Forensic Aspects of Driver Perception and Response**. Tucson: Lawyers & Judges, 2003.

ORLANDINI, G. **Desenvolvimento de Aplicativos Baseados em Técnicas de Visão Computacional para Robô Móvel Autônomo**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, 2012.

OZGUNER, U.; ACARMAN, T.; REDMILL, K. **Autonomous Ground Vehicles**. Norwood: Artech House, 2011.

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.

PINTO, C. How Autonomous Vehicle Policy in California and Nevada Addresses Technological and Non-Technological Liabilities. **Intersect**. v. 5. n.1. 2012.

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.

POMERLEAU, D. RALPH: Rapidly Adapting Lateral Position Handler. In: 1995 IEEE SYMPOSIUM ON INTELLIGENT VEHICLES. Detroit, 1995. **Proceedings...** 1995. p. 506 - 511.

RACKLIFFE, N.; YANCO, H.A.; CASPER, J. Using Geographic Information Systems (GIS) for UAV Landings and UGV Navigation. In: 2011 IEEE CONFERENCE ON TECHNOLOGIES FOR PRACTICAL ROBOT APPLICATIONS (TEPRA). 3., 2011, Boston. **Proceedings...** 2011.p. 145-150.

REINA, C.D. **Roteirização de veículos com janela de tempo utilizando algoritmo genético.** 2012. 90 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ROBINSON, T.; CHAN, E.; COELINGH, E. Operating Platoons on Public Motorways: An Introduction to The SARTRE Platooning Programme. In: ITS WORLD CONGRESS. 17., Busan, 2010. **Proceedings...** 2010.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach.** 3.ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2010.

SECCHI, H.A. **Una Introducción a los Robots Móviles.** San Juan: Universidad Nacional de San Juan, 2008.

SEGANTINE, P.C.L. **GPS: Sistema de Posicionamento Global.** São Carlos: EESC/USP, 2005.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSH, I.R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction To Autonomous Mobile Robots.** 2 ed. Cambridge: MIT Press, 2011.

SPASSOV, I. **Algorithms for map-aided autonomous indoor pedestrian positioning and navigation.** 2007. 139 p. Tese (Doutorado). Faculté de L'Environnement Naturel, Architectural et Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2007.

THRUN, S. Exploration and model building in mobile robot domains. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS. Seattle, 1993. **Proceedings...**Seattle,1993. p.175-180

THRUN, S. Learning Metric-Topological Maps for Indoor Mobile Robot Navigation. **Artificial Intelligence.** v.99, n.1, p.21-71,1998.

THRUN, S. Learning occupancy grids with forward models. In: CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS'2001). Maui, 2001. **Proceedings...**Maui, 2001. p.1676-1681.

THRUN, S. **Robotic Mapping: A Survey.** 2002.

THRUN, S. **Artificial Intelligence for Robotics: Programming a Robotic Car (CS373),** 2014.

THRUN, S.; BURGARD, W.; FOX, D. **Probabilistic Robotics.** Cambridge: MIT Press, 2005.

THRUN, S. *et al.* Stanley: The Robot that Won the DARPA Challenge. **Journal of Field Robotics.** v.23, n.9, 2006. p. 661–692.

TSUGAWA, S. Vision-based vehicles in Japan: machine vision systems and driving control systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v.41, n.4, p.398-405, 1994.

URMSON, C. *et al.* Autonomous Driving in Traffic: Boss and the Urban Challenge. **AI Magazine**, v. 30, n. 2, p.17-29, 2009.

WETMORE, J. Driving the Dream: The History and Motivations behind Sixty Years of Automated Highway Systems in America. **Automotive History Review**, p. 4- 19, 2003.

WICKENS, C.D.; HOLLANDS, J.G. **Engineering Psychology and Human Performance**. 3 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

WOLF, D.F. *et al.* Robótica Móvel Inteligente: Da Simulação às Aplicações no Mundo Real. In: XXIX CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DA COMPUTAÇÃO. Bento Gonçalves, 2009. **Anais...** Bento Gonçalves, 2009. p.279-330.

XBOT. **Apostila de Software**. Versão 1.1. São Carlos: Xbot, 2011.

XBOT. **Manual do usuário RoboDeck**. Versão 1.0. São Carlos: Xbot, 2011.

XIE, M. **Fundamentals of Robotics**: Linking Perception to Action. Series in Machine Perception and Artificial Intelligence. v.54. Singapore: World Scientific Publishing, 2003.

GLOSSÁRIO

- ***Advanced Driver Assistance Systems*** – ver Sistemas de Assistência Avançada ao Motorista.
- **Ambiente** – conjunto de elementos externos com os quais o veículo deve interagir para realizar sua navegação.
- **Condutor** – designação do ser humano que controla um veículo de transporte. No contexto dos VATs, condutor é aquele que gerencia e supervisiona os processos de navegação autônoma.
- **Estado do ambiente** – conjunto de variáveis que permitem definir o comportamento do ambiente no espaço e no tempo.
- **Estado do veículo** – conjunto de variáveis que permitem definir o comportamento do veículo no espaço e no tempo.
- ***Intelligent Transportation Systems*** – ver Sistemas Inteligentes de Transportes.
- **Mapa Computacional** – representação que o veículo mantém sobre o ambiente.
- **Missão** – estado (em geral, na forma de uma posição no espaço) a ser atingido pelo veículo a partir do seu estado atual.
- **Sistemas de Assistência Avançada ao Motorista** – sistemas que automatizam processos específicos da condução veicular, porém a tomada de decisão final ainda é realizada pelo condutor.
- **Sistemas Inteligentes de Transporte** – conjunto de tecnologias computacionais utilizadas para automatizar processos e componentes do sistema de transportes (infraestrutura, veículos, etc.).
- **Tomada de Decisão** – conjunto de processos que gera e seleciona uma ação adequada a ser executada para resolução de um problema específico.

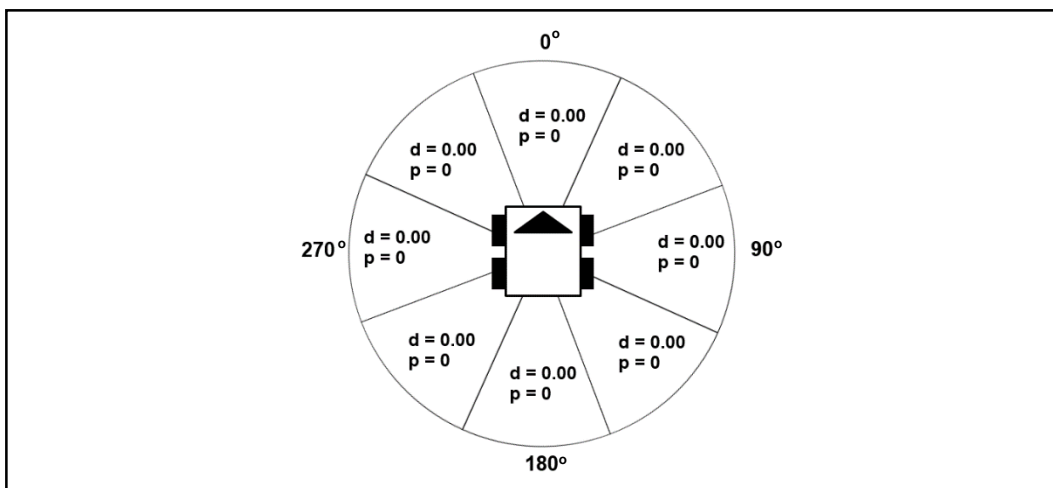
- **Tomada de Decisão Deliberativa** – modelo de sistema computacional no qual as ações são planejadas preliminarmente e executadas com pouca alteração após o início de sua ação.
- **Tomada de Decisão Híbrida** – modelo de sistema computacional que combina a tomada de decisão deliberativa e a tomada de decisão reativa combinadas. Desta forma, algumas ações podem ser realizadas de forma reativa, enquanto outras ações podem ser realizadas de forma deliberativa.
- **Tomada de Decisão Reativa** – modelo de sistema computacional no qual as ações são responsivas e geradas conforme os eventos são sensorizados do ambiente.
- **Veículo Autônomo** – veículo que possui recursos tecnológicos que permitem prescindir da condução humana de forma permanente.
- **Veículo Inteligente** – veículo que possui recursos tecnológicos associados à sua estrutura, mas que não permite prescindir da condução humana. O objetivo dos recursos tecnológicos integrados é, assim, otimizar e auxiliar a condução realizada por um condutor humano.

APÊNDICE A - EXEMPLO DE GRADE DE PRIORIDADES

Este é um exemplo didático com o objetivo de explicar as operações sobre a Grade de Prioridades. Para facilitar a visualização, a Grade utilizada como exemplo será de baixa densidade (8 posições), onde cada região possui 45 graus de abertura. Também considera-se que todas as medições possuem a mesma marca temporal.

- **1ª Etapa:** verifica-se se a posição atual do veículo é igual à missão proposta. Caso não seja, cria-se a Grade de Prioridades com a Configuração de Segurança $d = 0.00$ e $p = 0$ para todas as regiões do espaço (Figura 40).

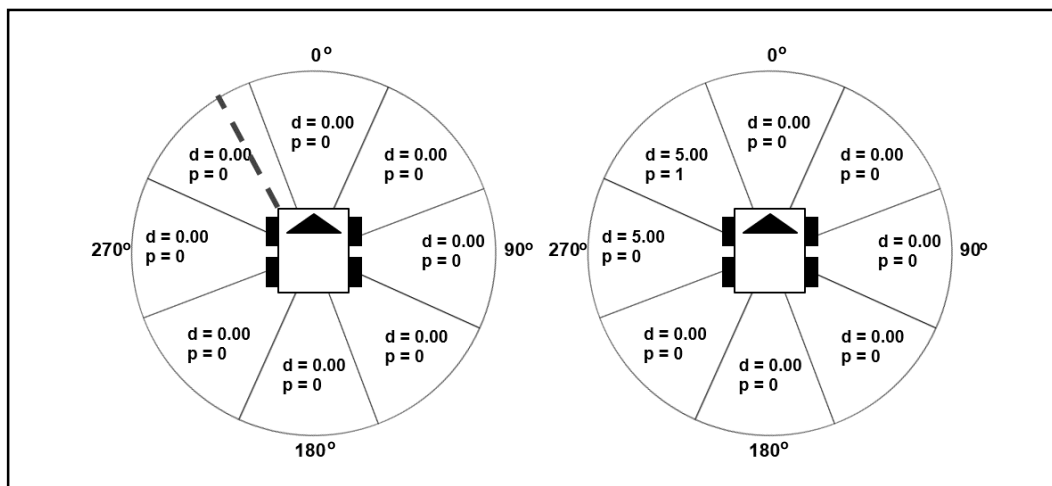
Figura 40: Grade de Prioridades no Estado de Segurança



Fonte: O Autor.

- **2ª Etapa:** obtém-se o ângulo e a distância entre a posição atual do veículo e a próxima posição do ambiente a ser alcançada. Considerando que, por exemplo, a diferença entre a posição atual do veículo e a próxima posição a ser alcançada seja de 5 metros e o ângulo de diferença entre as posições seja de $-0,523 \text{ rad}$ (ou -30° ou 330°), atualiza-se a seção mais próxima ao movimento sugerido (Figura 41).

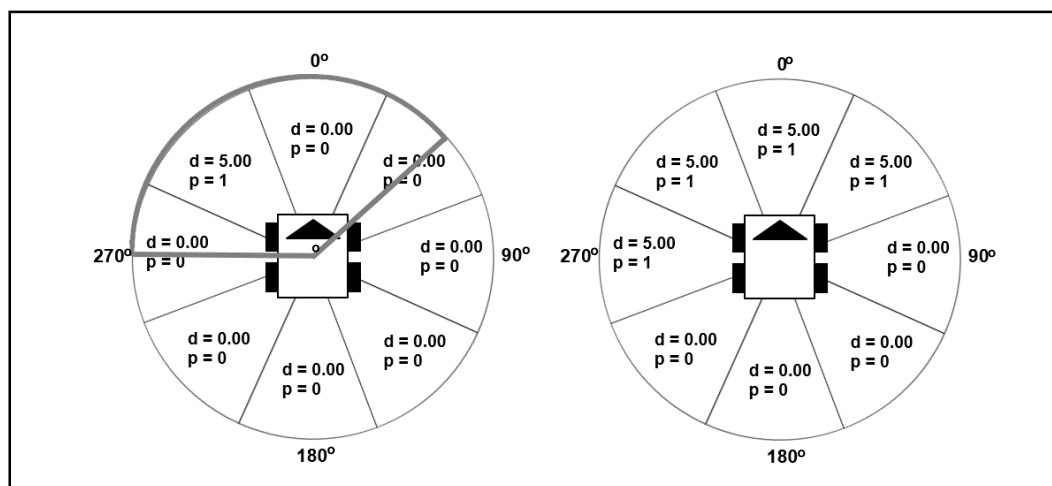
Figura 41: Atualização da Grade de Prioridades baseada na rota planejada (linha tracejada)



Fonte: O Autor.

A seguir, constrói-se a Janela de Navegação com o objetivo de definir as regiões pelos quais o veículo pode navegar em relação ao planejamento inicial: a abertura engloba as regiões abrangidas pelo ângulo de esterçamento para ambos os lados que o veículo pode atingir (Figura 42).

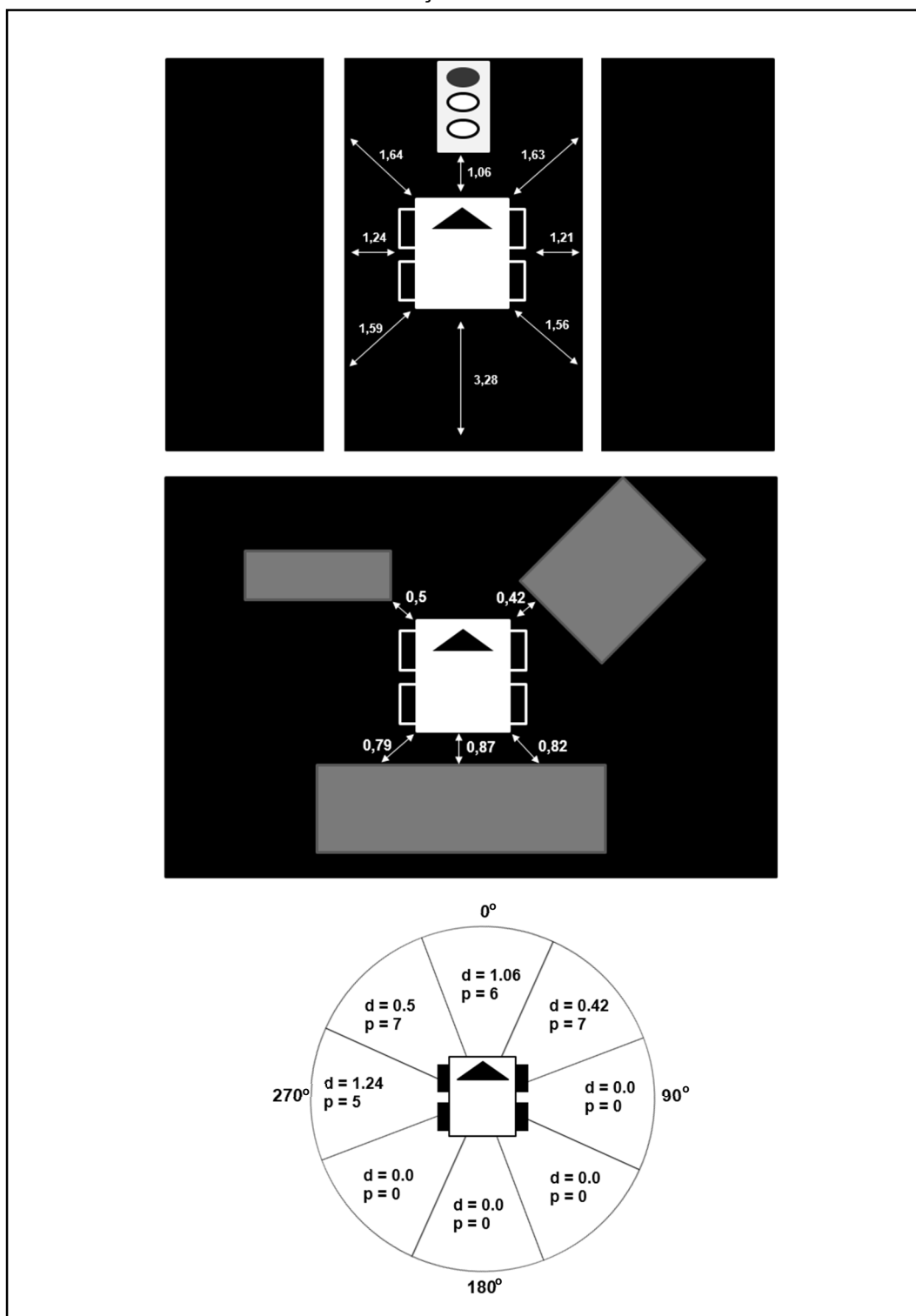
Figura 42: Criação da janela de navegação baseada na rota planejada



Fonte: O Autor.

- **3ª Etapa:** aplicam-se os dados de restrição sobre a Grade, atualizando os dados de acordo com suas marcas temporais, restrição de distância e prioridades (Figura 43).

Figura 43: Atualização da Grade de Prioridades baseada em medições de restrição de sinalização e de colisão

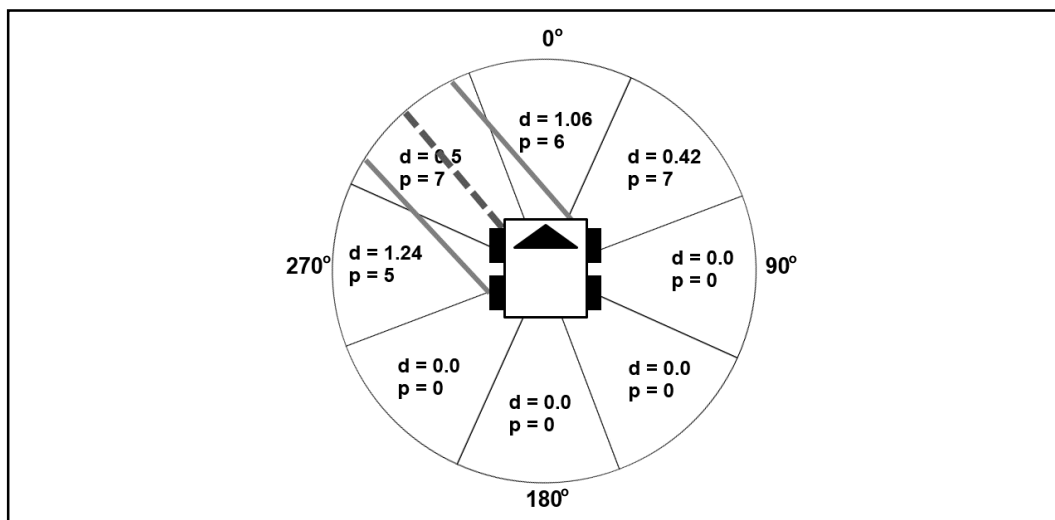


Fonte: O Autor.

- **4ª Etapa:** com a Grade finalizada, calcula-se a quantidade de setores circulares necessários para a travessia do veículo: no caso da Grade

utilizada como exemplo, o veículo necessita de um espaço mínimo de 3 setores circulares para o veículo atravessar qualquer região. Para isto obtém-se todos os agrupamentos de setores da Grade com este tamanho e o maior valor de distância conjunta entre elas. A Região de Agrupamento que inicia em $247,5^\circ$ é a que possui a maior distância conjunta ($d = 0,5$ m), sendo que a diferença entre a região 0° (à frente do veículo) e 315° (meio da Região de Agrupamento) é -45° (ou $-0,7854$ rad). Assim, a ação de movimento será dada, então, em duas variáveis: a distância conjunta será convertida para a velocidade de movimento sob a forma $d / 1$ s (o que gerará $0,5$ m/s) e a orientação de movimento é $-0,78$ rad (Figura 44). Estes valores serão então ajustados, a seguir, de acordo com as restrições mecânicas do veículo e dos atuadores para realizar a ação adequada no ambiente.

Figura 44: Ação de movimento obtida da Grade de Prioridades



Fonte: O Autor.

APÊNDICE B – ATRIBUTOS DOS CONJUNTOS DE DADOS

B.1 ATRIBUTOS DO MODELO DO VEÍCULO

Atributo	Característica
Nome Identificador do Veículo	Nome individual, específico e imutável que diferencie o veículo dentre outros do mesmo tipo. A arquitetura VAT-EVA não estabelece um padrão, mas recomenda-se a adoção do Número de Identificação do Veículo (<i>Vehicle Identification Number</i>), código único utilizado pela indústria automobilística para fins de identificação definido na norma <i>International Organization for Standardization (ISO) 3833</i> .
Data de Criação do Veículo	Data na qual o veículo foi finalizado e disponibilizado para uso. O objetivo é determinar períodos de manutenção posteriores.
Categoria do Veículo	Determina o tipo de veículo para efeitos de sinalização e legislação. No modelo padrão VAT-EVA é padronizado de acordo com o artigo 143 do CTB.
Classe do veículo	Determina a classe (tipo de condutor e privilégios) do veículo para efeitos de legislação, sinalização e prioridade. É estabelecido de acordo com a conveniência do desenvolvedor. No modelo padrão VAT-EVA é associado às cores de placas no Brasil.
Sistema de referência do veículo	Define o sistema de referência espacial padrão para os dados do veículo e para o qual todos os dados de outros sistemas devem ser convertidos. No caso do VAT-EVA, utiliza-se o sistema WGS84 (G1674).
Época de Referência	Define-se a época padrão associada ao sistema espacial do veículo (no formato de data juliana modificada).
Altura do veículo	Determina a altura do veículo em metros para estabelecer os locais em que o veículo pode ou não passar de acordo com dados de sensores específicos.
Comprimento do veículo	Comprimento do veículo em metros para determinar os locais em que o veículo pode ou não passar de acordo com dados de sensores específicos

Largura do veículo	Largura do veículo em metros para determinar os locais em que o veículo pode ou não passar de acordo com dados de sensores específicos.
Peso do veículo	Peso original (em quilos) da estrutura do veículo.
Altura do Piso do Veículo	Menor altura em metros entre o piso do veículo e a extremidade superior da superfície sobre a qual está o veículo.
Distância entre os eixos laterais	Valor em metros utilizado para determinar o ponto médio ao qual se associa ângulo e o valor de esterçamento.
Distância entre os eixos frontais e dianteiros	Valor em metros associado ao valor de L do modelo cinemático do veículo.
Ângulo de esterçamento	Valor em graus ou radianos que determina o limite máximo de esterçamento que as rodas do veículo podem realizar.
Velocidade máxima	Valor em metros por segundo que define a máxima velocidade que o veículo pode desenvolver, independente do ambiente.
Limite mínimo de energia	Estabelece um valor mínimo em porcentagem de energia que o veículo deve possuir para realizar suas funções sem comprometer a sua segurança. Ao atingir este limite mínimo, o veículo assume imediatamente uma configuração de segurança que permita manter a integridade do veículo.
Limite máximo de peso	Valor em quilos que estabelece o limite máximo de peso variável do veículo que pode ser atingido para realizar suas funções sem comprometer a sua segurança. Ao atingir o valor máximo estabelecido, o veículo assume imediatamente uma configuração de segurança que permita manter a integridade do veículo.
Limite máximo dos sensores de colisão	Valor em metros que estabelece o alcance máximo obtido pelos sensores de colisão do veículo. O valor obtido é utilizado para construção da grade do ambiente do Modelo do Ambiente do veículo.
Distância Frontal de Segurança Estática	Valor em metros que estabelece a distância que o veículo deve manter em relação a qualquer objeto estático do ambiente. Por padrão, o VAT-EVA mantém uma distância de segurança estática de 30 centímetros.
Distância Frontal de Segurança Dinâmica (Distância de Seguimento)	Valor em metros que o veículo deve manter em relação a qualquer objeto dinâmico (i.e., em movimento), no ambiente.

	Considera-se que este valor é, por padrão, igual à velocidade atual (em m/s) do veículo multiplicado por 3 segundos.
Distância máxima do veículo com energia completa	Estabelece a distância máxima que pode ser realizada pelo veículo com a quantidade máxima de energia armazenada. O valor obtido é utilizado como parâmetro para determinar se o veículo pode cumprir uma dada navegação ou não.

B.2 ATRIBUTOS DO ESTADO DO VEÍCULO

Atributo	Característica
Posição (Pose)	Expressa por (X, Y, θ, ϕ, t) , onde X e Y são as coordenadas cartesianas dadas para o sistema de referência e época padrão do veículo conforme estabelecido no Modelo do Veículo, θ o ângulo em radianos em um determinado tempo, ϕ o ângulo de esterção das rodas frontais e t é o tempo em que a medição foi obtida.
Altitude	Altitude do veículo em metros de acordo com o <i>datum</i> vertical do sistema de referência.
Velocidade média das rodas traseiras (u_1)	Valor da velocidade média das rodas traseiras (em metros por segundo)
Velocidade média de esterçamento (u_2)	Valor da velocidade média de esterçamento das rodas dianteiras (em metros por segundo).
Época atual	Época atual do veículo em data juliana, utilizada para conversões entre dados em sistemas de referência e épocas diferentes associados ao veículo.
Data e Hora Atual	Tempo atualizado local do veículo dentro do sistema de tempo vigente. Este sistema é utilizado para compartilhamento de dados, sincronização entre veículos e marcação de tempo em medições. Desta forma, recomenda-se sua sincronização periódica com um padrão de tempo externo para corrigir possíveis erros de deriva.
Energia atual do veículo	Um valor entre porcentagem que representa a quantidade de energia disponível no veículo. Está associado ao limite mínimo de energia estabelecido no Modelo do Veículo, de modo que quando o limite é atingido, o veículo deve assumir imediatamente uma configuração de segurança.

Peso atual do veículo	Incluindo a carga adicional carregada. Está associado ao limite máximo de peso estabelecido no Modelo do Veículo, de modo que quando o limite é atingido, o veículo deve assumir imediatamente uma configuração de segurança.
-----------------------	---

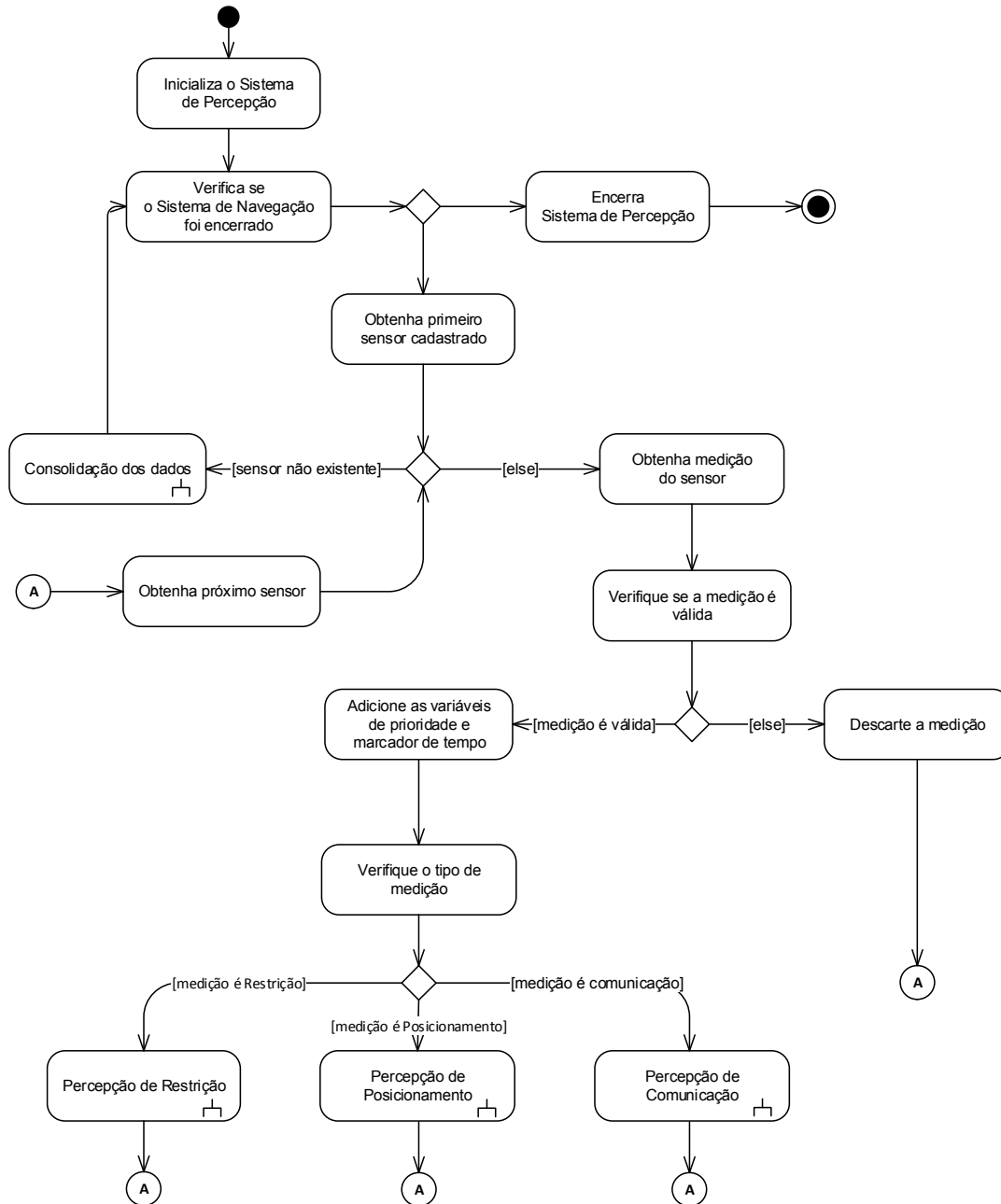
B.3 ATRIBUTOS DE ESTADO DO AMBIENTE

Atributo	Característica
Velocidade máxima permitida no ambiente	Expressa a velocidade máxima que pode ser exercida pelo veículo no ambiente em metros por segundo. A velocidade máxima considerada é aquela que é obtida do ambiente: caso não seja possível obter dados do ambiente, considera-se a velocidade estabelecida na rota seguida. No modelo VAT-EVA, se de alguma forma não se obtém dados de nenhuma destas fontes, considera-se como velocidade máxima a mínima estabelecida pelo CTB de 8,3 m/s em vias de transportes e 2,77 m/s em ambientes internos.
Velocidade mínima permitida no ambiente	Expressa a velocidade mínima a ser exercida pelo veículo no ambiente quando possui espaço livre para navegação. No modelo VAT-EVA, considera-se o art. 62 do CTB que estabelece-se que a velocidade mínima não deve ser inferior à metade da velocidade máxima do ambiente, respeitada as condições operacionais do trânsito e da via (BRASIL, 1997).

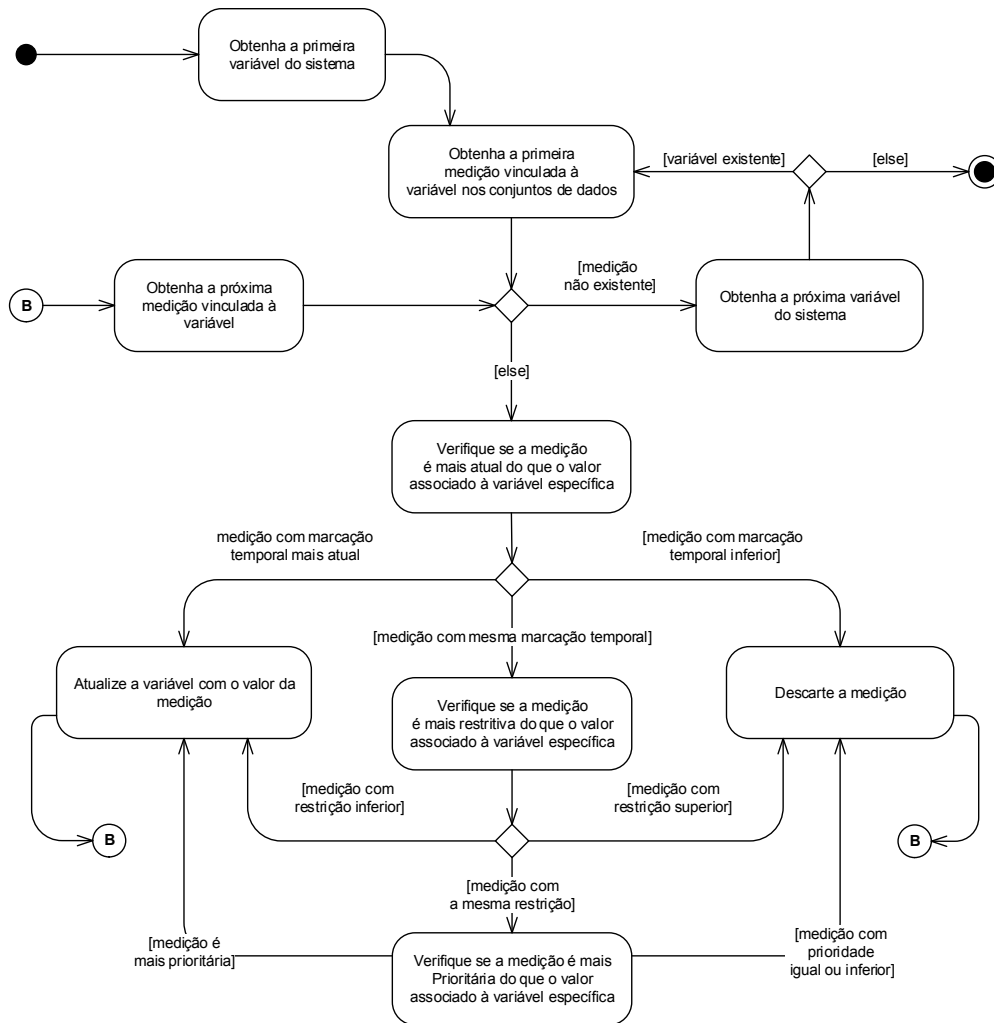
APÊNDICE C – DIAGRAMAS DE ATIVIDADES DO VAT-EVA

C.1 PERCEPÇÃO

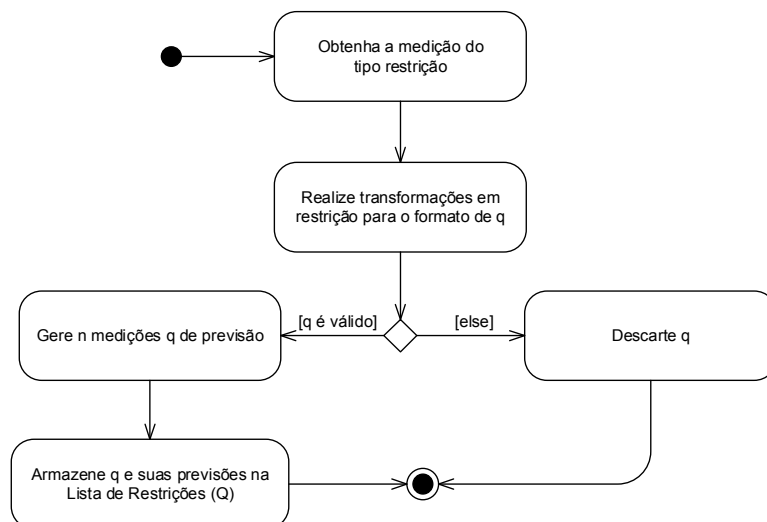
C.1.1 Sistema de Percepção



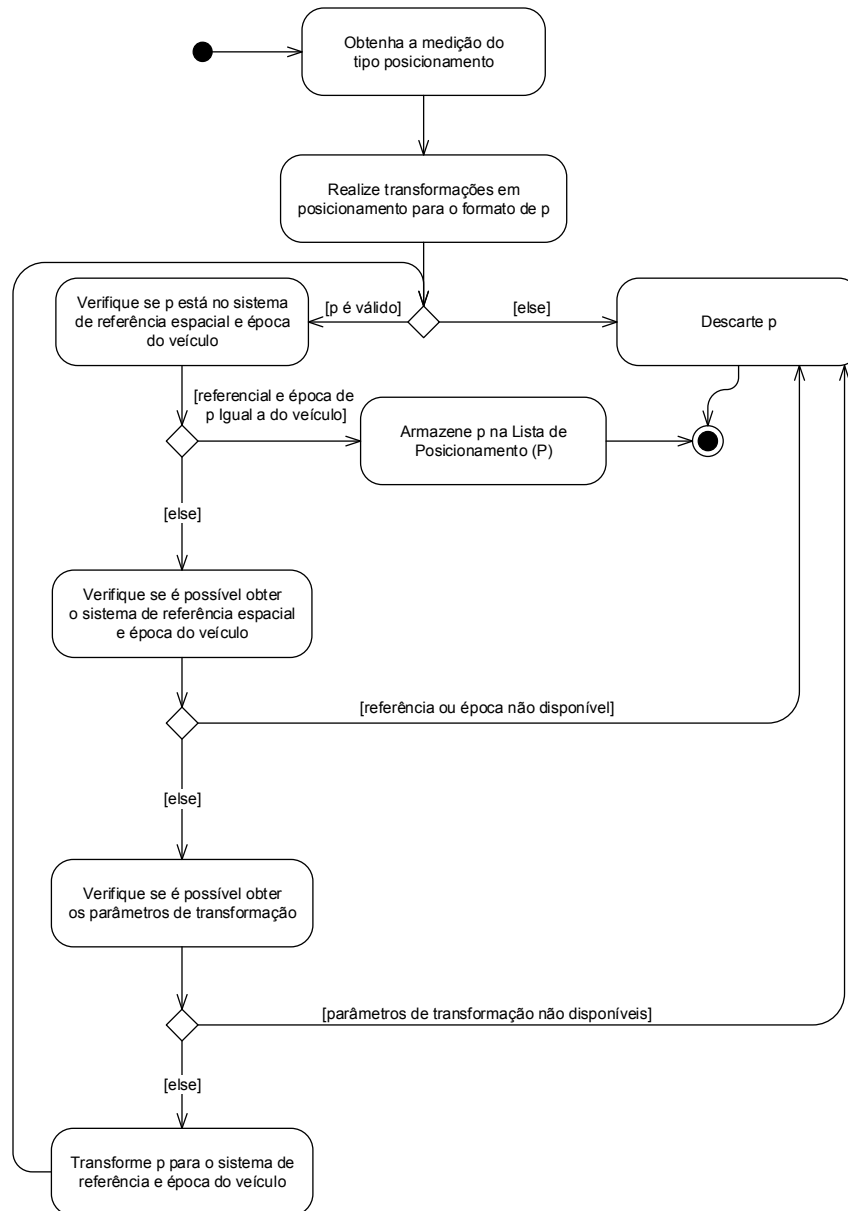
C.1.2 Subsistema de Percepção de Consolidação dos Dados



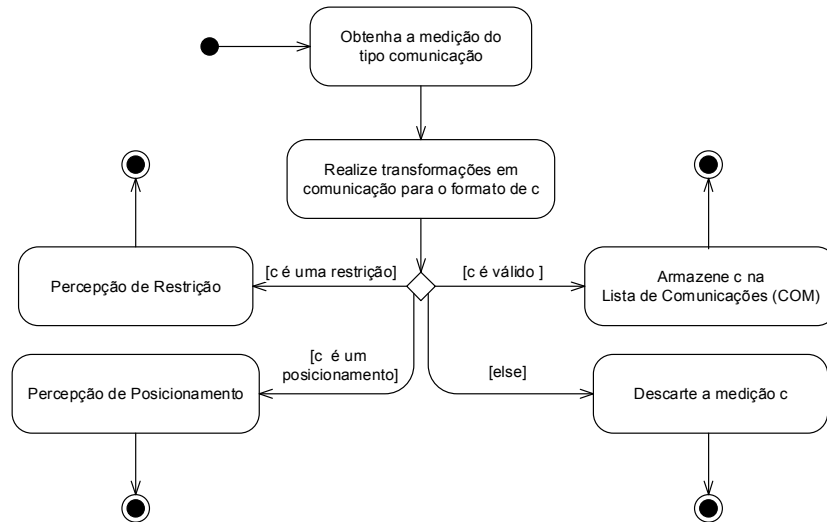
C.1.3 Subsistema de Percepção de Restrição



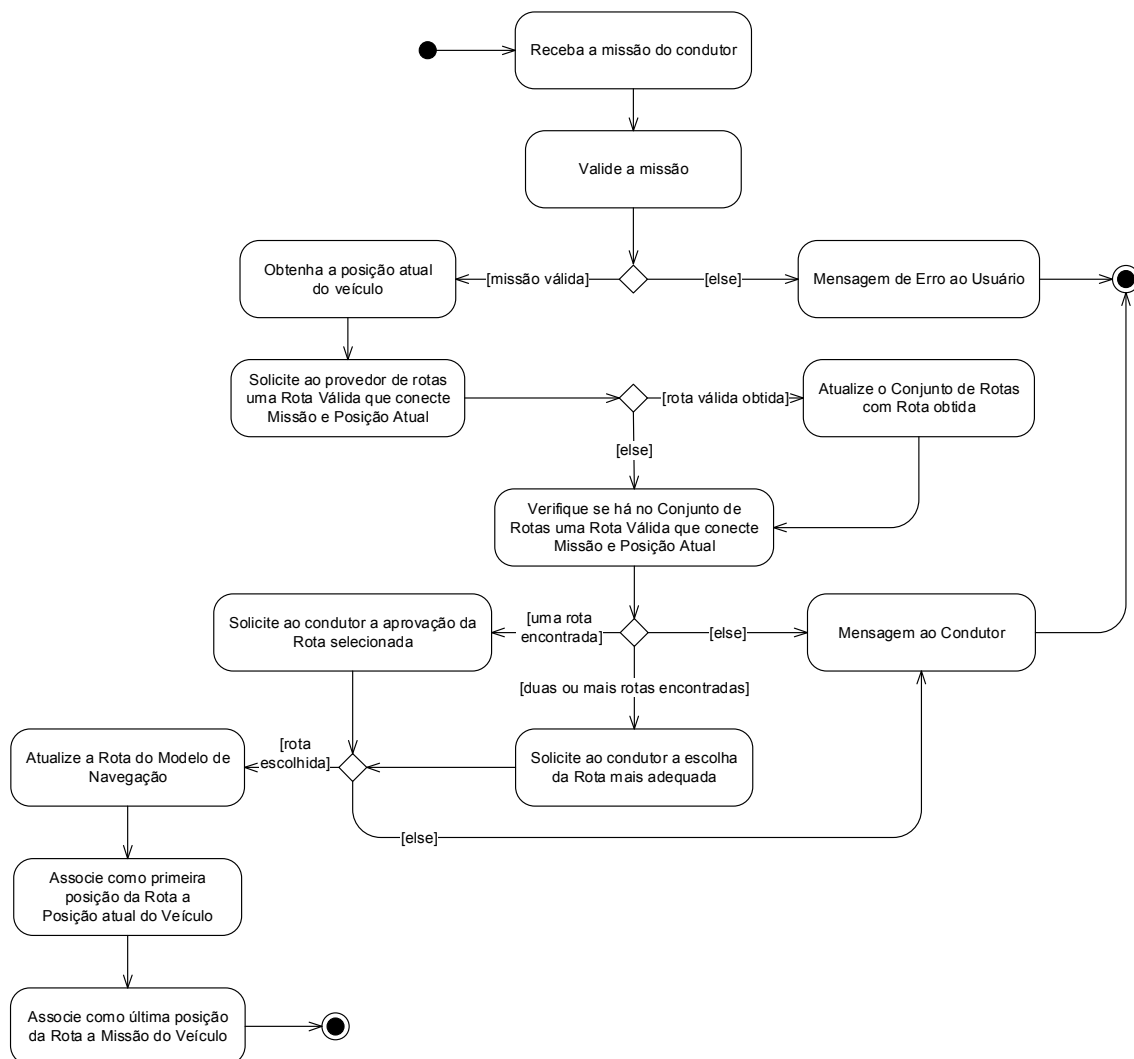
C.1.4 Subsistema de Percepção de Posicionamento



C.1.5 Subsistema de Percepção de Comunicação

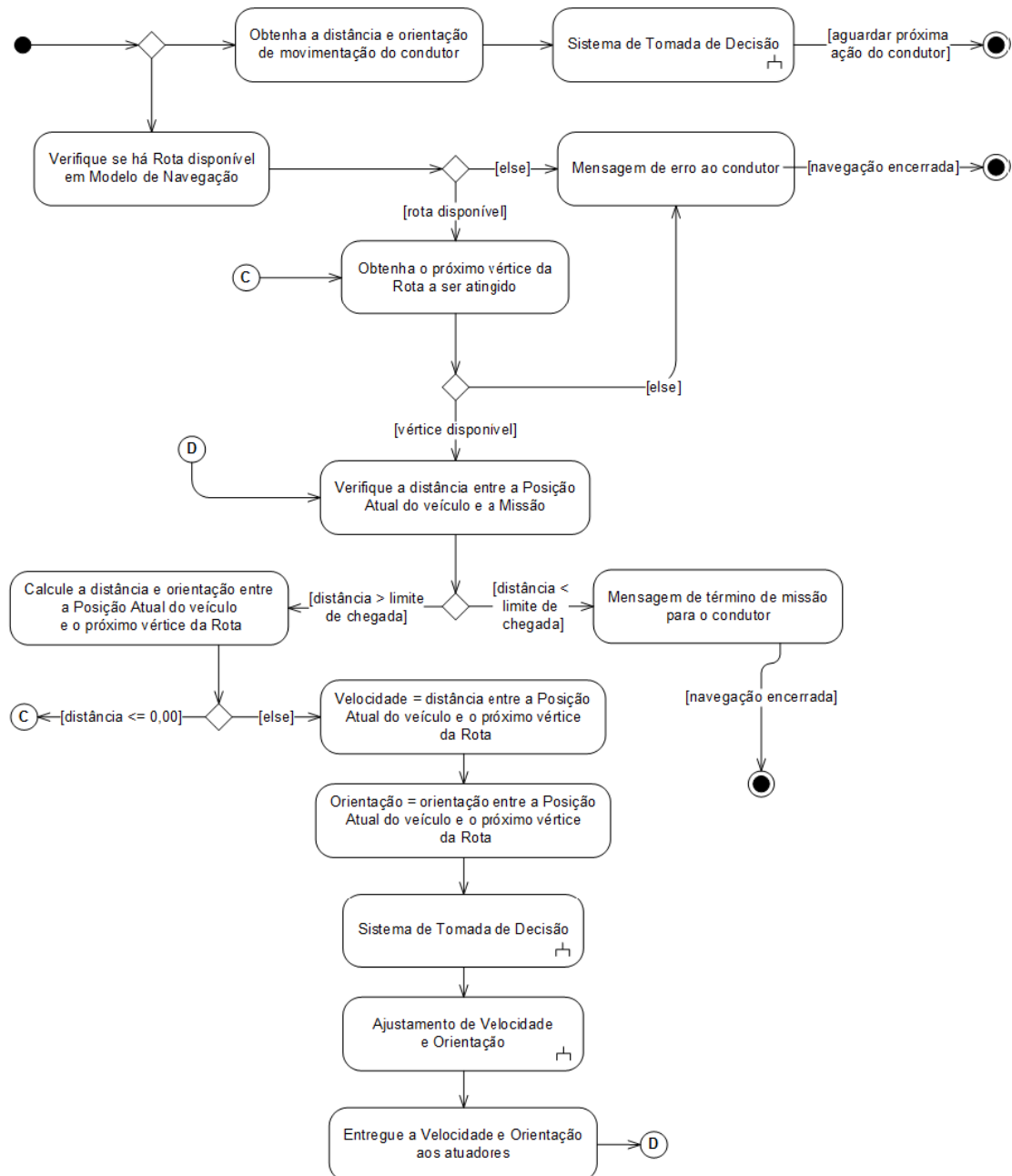


C.2 SISTEMA DE PLANEJAMENTO

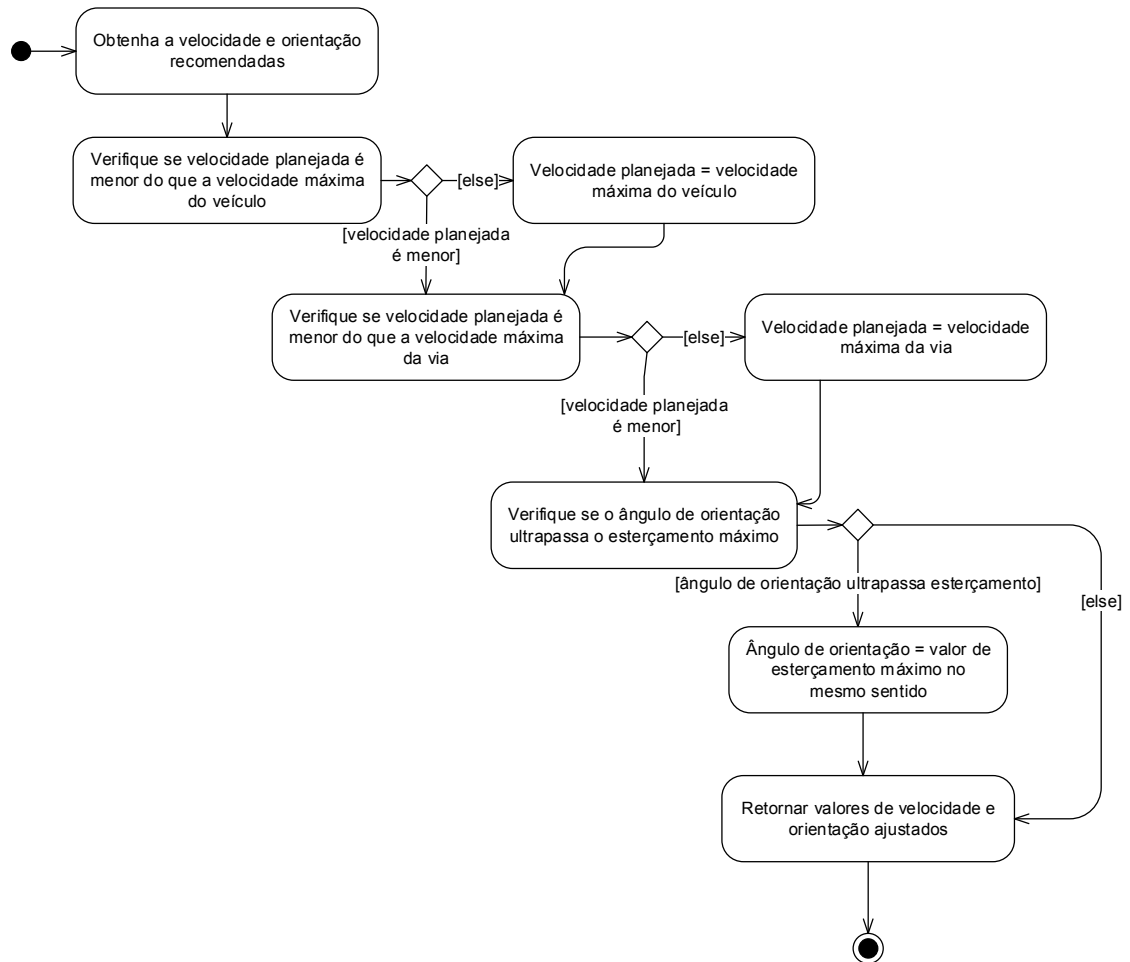


C.3 SISTEMA DE MOBILIDADE

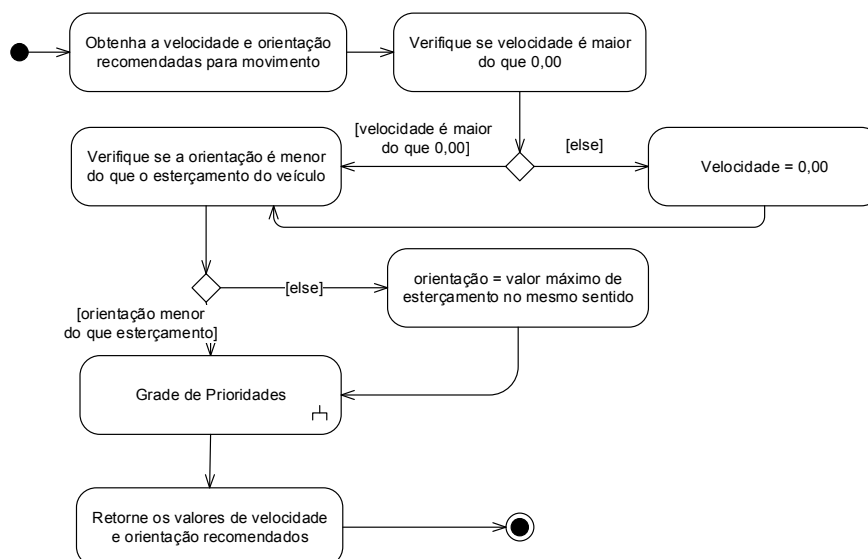
C.3.1. Sistema de Mobilidade Global



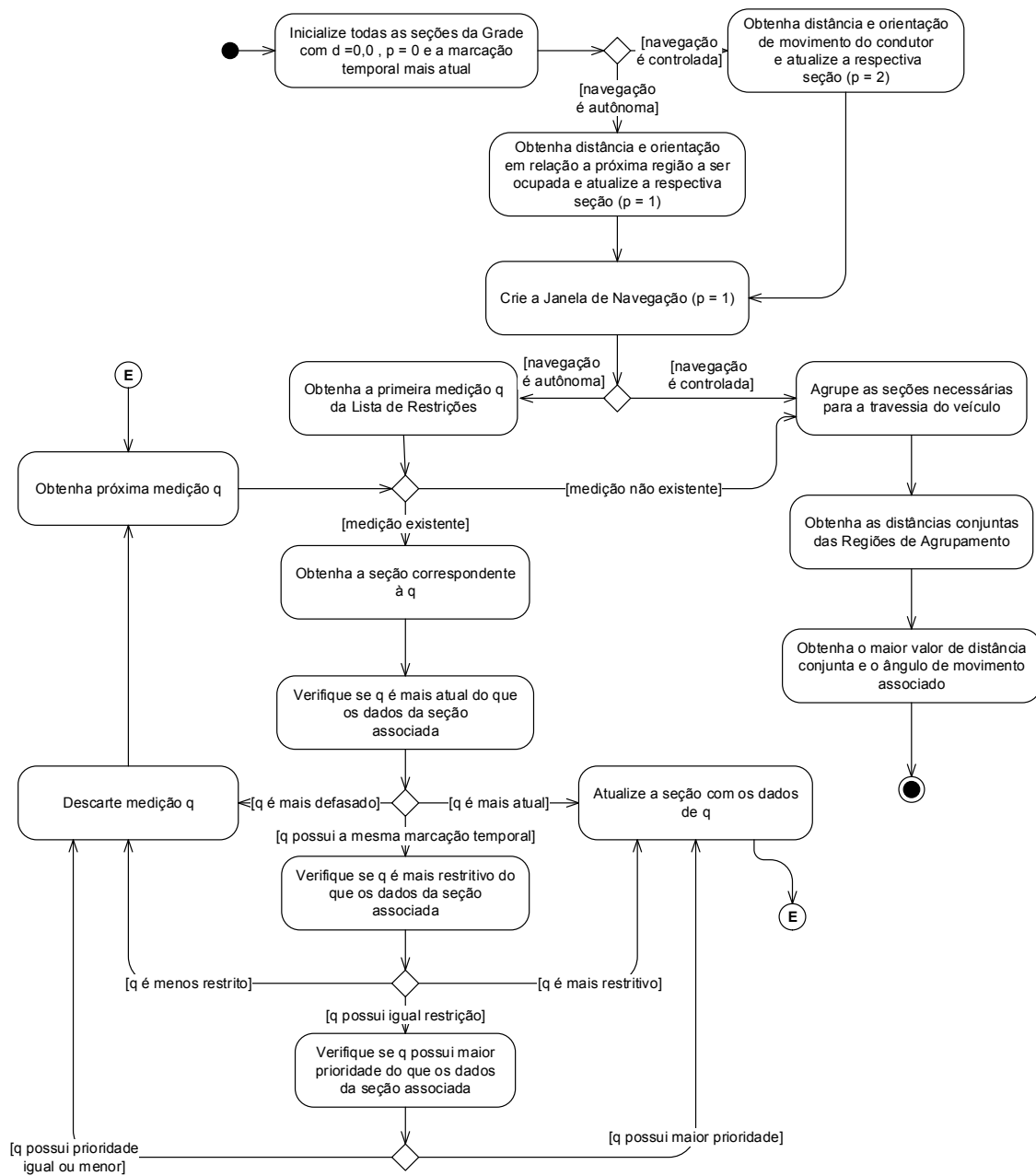
C.3.2 Subsistema de Ajustamento de Velocidade e Orientação



C.3.3 Subsistema de Tomada de Decisão

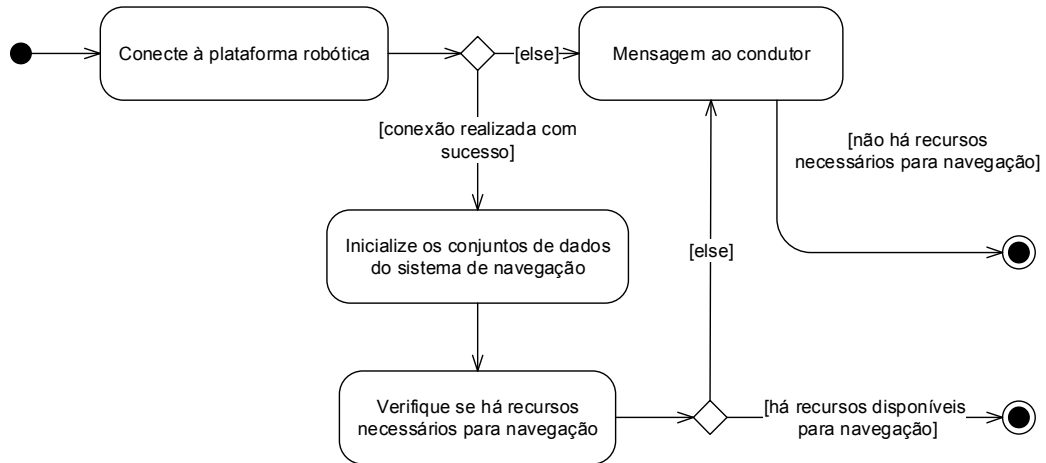


C.3.4 Grade de Prioridades

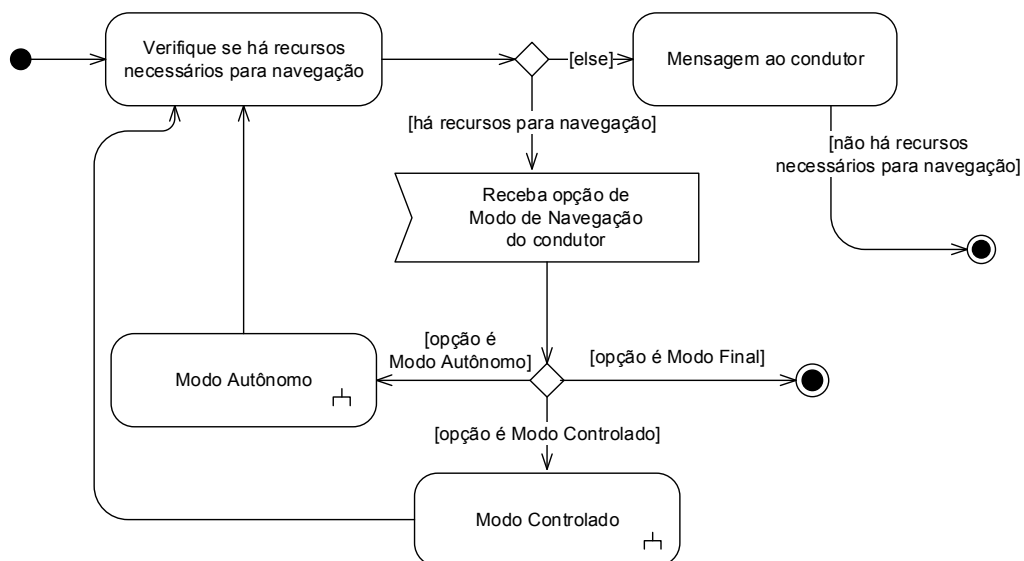


APÊNDICE D- MODOS DE OPERAÇÃO DO VAT-EVA

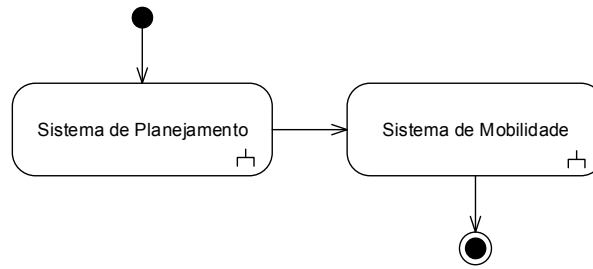
D.1 MODO DE OPERAÇÃO INICIAL



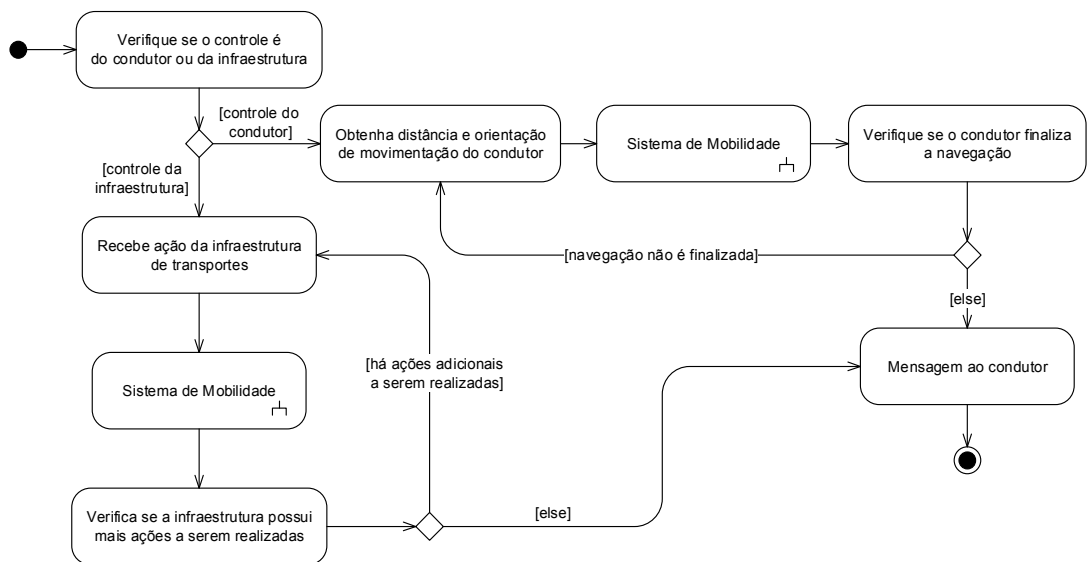
D.2 MODO DE OPERAÇÃO DE ESPERA



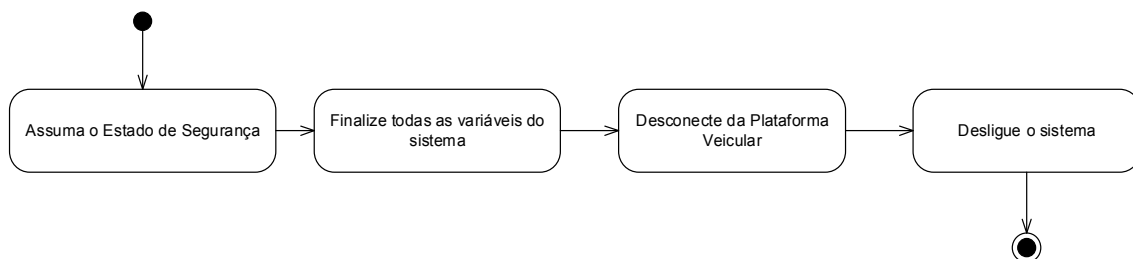
D.3 MODO DE OPERAÇÃO AUTÔNOMO



D.4 MODO DE OPERAÇÃO CONTROLADO



D.5 MODO DE OPERAÇÃO FINAL



APÊNDICE E - PLATAFORMA ROBODECK

Robodeck é uma plataforma robótica desenvolvida pela empresa XBot e concebida para fins educacionais e científicos nas áreas de programação de computadores e robótica (XBOT, 2011b; ORLANDINI, 2012). Suas principais características são descritas no Quadro 7.

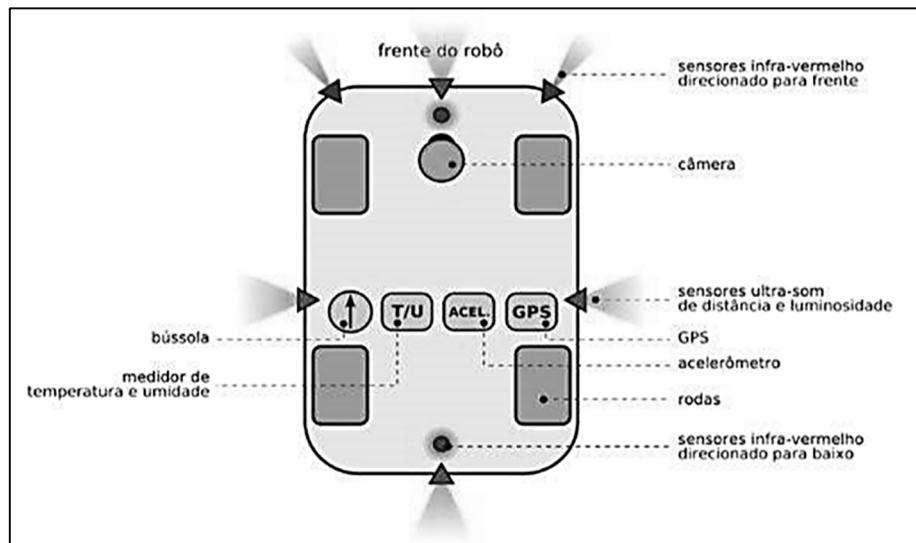
Quadro 7: Características da Plataforma Robodeck

Características	Valores
Dimensões	740 x 514 x 327,1 mm
Quantidade de rodas	4 (2 traseiras, 2 frontais) com tração nas rodas dianteiras.
Peso	15 a 18 kg (varia conforme quantidade de baterias)
Chão de habilitação	70,2 mm
Temperatura	de 5° C até 21° C (em operação padrão)
Baterias	6 x 18 V / 3 Ah
Direção	47° graus interno e 47° graus externo
Velocidade Máxima	entre 3 a 5 km/h
Terreno	<i>Indoor</i>
Sensores de Colisão	4 sensores ultrassônicos (com alcance de 3 metros e abertura de 45° cada), 4 sensores infravermelhos (com alcance de 0,3 metros e abertura de 5° cada)
Sensores de Posicionamento	Bússola, GPS, Acelerômetro
Sensores de Comunicação	Wi-Fi, ZigBee
Outros sensores	Temperatura, Umidade, <i>Webcam</i>

Fonte : Muñoz (2011); XBot (2011a; 2011b) e Orlandini (2012).

A Figura 45 apresenta a distribuição dos sensores do Robodeck e como estão organizados os elementos internos.

Figura 45: Diagrama do Robodeck



Fonte: XBot (2011b)

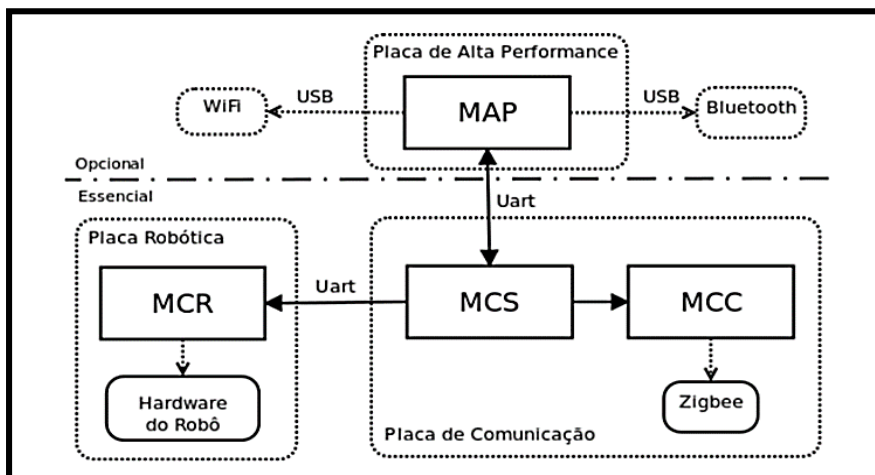
O *hardware* essencial do RoboDeck é composto por dois módulos micro controlados: um ARM9 para o controle das funções básicas do robô como movimentação e coleta de dados dos sensores e um micro controlador Jennic próprio para o gerenciamento da comunicação com interface para redes ZigBee.

O Robodeck também conta com um *hardware* opcional chamado de Placa de Alta Performance que é uma placa NanoITX com um módulo de alta performance integrado ao sistema operacional *Debian Squeeze Linux* (ORLANDINI, 2012). O objetivo desta placa é agregar autonomia e comunicação banda larga ao robô, contendo o Módulo de Alta Performance (MAP), um conjunto de instruções de alto nível para o controle do robô. É através do MAP também que o robô consegue conectar-se via WiFi ou *Bluetooth*, e também realizar a captura de imagens via *webcam*.

Para agregar autonomia ao robô, o MAP permite que aplicativos controlem o *hardware* essencial do robô através de comandos enviados diretamente ao Módulo de Controle de Sessão (MCS) (MUÑOZ, 2011). O MCS também é responsável pela autenticação dos aplicativos, além de repassar diretamente para o MCR (Módulo de Controle Robótico) os comandos robóticos enviados pelo MAP. A Figura 46 ilustra uma visão geral da arquitetura de software do robô,

mostrando sua relação com o *hardware* essencial e o *hardware* opcional (ORLANDINI, 2012).

Figura 46: Visão geral da arquitetura do Robodeck.



Fonte: Munõz (2011).