

VEÍCULOS AUTÔNOMOS: CONCEITOS, HISTÓRICO E ESTADO-DA-ARTE

Rodrigo de Sousa Pissardini

Daniel Chin Min Wei

Edvaldo Simões da Fonseca Júnior

Departamento de Engenharia de Transportes
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Este artigo apresenta as definições, os conceitos e os aspectos históricos relacionados às pesquisas sobre carros robóticos, modelo de veículo cuja proposta é a automação da condução veicular. Conjuntamente, descrevem-se as principais motivações e problemas a serem considerados no desenvolvimento e adoção de carros robóticos para propósitos gerais em larga escala sob a visão dos sistemas de transportes.

ABSTRACT

This paper presents the definition, concepts and historical aspects involved in research on robotics cars, a model of vehicle whose purpose is the automation of the driving car. Together, we describe the motivations and problems related with the development and adoption of robotics cars for general purposes in large-scale under the vision of transportations systems.

1. INTRODUÇÃO

Carro robótico, carro sem motorista ou veículo autônomo são nomes dados a um tipo de veículo de transporte, de passageiros ou bens, dotado de um sistema de controle computacional que integra um conjunto de sensores e atuadores com a função de, a partir de uma missão inicial (local para onde ir) estabelecida pelo usuário, navegar de forma autônoma e segura sobre a superfície terrestre (Ozguner *et al.*, 2007; Gonçalves, 2011). O processo de navegação combina diversas etapas automatizadas para obter dados do ambiente, determinar a posição do veículo, evitar a colisão com outros elementos do ambiente e executar ações ótimas em direção à missão proposta.

Carros robóticos são originados de dois segmentos específicos: os Sistemas Inteligentes de Transportes (*Intelligent Transportation Systems* – ITS) e a Robótica Móvel. Diferentemente de outros tipos de veículos autônomos (como os veículos não-tripulados terrestres e veículos utilizados para tarefas específicas em ambientes controlados), um carro robótico possui como principais requisitos:

- Servir para transporte de seres humanos e de bens;
- Possuir capacidade de navegação em larga escala (no tamanho mínimo de uma cidade);
- Ser capaz de sensoriar, processar e responder a eventos dinâmicos e estáticos do ambiente em um tempo adequado de forma similar ou superior ao desempenho desenvolvido por condução humana.

Desta forma, o projeto de um carro robótico demanda requisitos de projeto que ofereçam alta confiabilidade, redundância e segurança conservadora (Benenson, 2009). Carros robóticos podem ser originados de veículos originalmente desenvolvidos sob esta proposta ou pela

integração de sensores, atuadores e sistema de controle a um veículo não-robótico.

A nomenclatura, em um primeiro momento, parece referenciar apenas a automação de condução em automóveis, cuja definição de acordo com o Código Brasileiro de Trânsito (CTB) é “veículo automotor destinado ao transporte de até oito passageiros excluído o motorista” (Brasil, 1997). No entanto, a definição de carro robótico está associada ao processo de autonomia de controle da condução, independentemente do tipo de veículo e da tecnologia empregada neste processo, o que permite que outros tipos de veículos possam aderir à nomenclatura de carro robótico. Entre veículos que possam ser automatizados incluem-se os veículos motorizados de duas e três rodas, os veículos de transporte de carga, os veículos de transporte de passageiros de alta lotação (acima de oito pessoas desconsiderando-se o motorista) e os veículos de transporte de alta carga (todos aqueles com peso maior do que três toneladas e meia), conforme citados no artigo 96 do CTB (Brasil, 1997). Com o intuito de abranger os diferentes tipos de veículos que possam ser transformados em carros robóticos, a Equipe do Veículo Autônomo (EVA) do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PTR-EPUSP) utiliza a nomenclatura padrão de Veículo Autônomo de Transporte Terrestre (abreviação simplificada VAT) para descrever a estes veículos. O termo VAT será utilizado neste trabalho para designar qualquer tipo de carro robótico.

VATs ainda não estão disponíveis para o público geral até o ano de 2013, porém as pesquisas neste segmento apontam para o que deve ser o futuro das tecnologias associadas aos veículos de transporte terrestres (autônomos e semiautônomos). Desta forma, este artigo apresenta uma revisão dos principais, das justificativas, dos problemas e do histórico das principais pesquisas envolvidas na construção de VATs.

2. MOTIVAÇÕES E PROBLEMAS PARA PESQUISAS E ADOÇÃO DE VATS

2.1. Principais motivações para pesquisas e adoção de VATs

O principal fundamento associado à construção de VATs é a possibilidade de substituir a condução humana de veículos, em tempo integral ou parcial, por uma condução automatizada e segura realizada por um sistema computacional que combine algoritmos e ferramentas de alto desempenho para sensoriamento e tomada de decisão adequada para um determinado contexto de navegação.

Diversas motivações têm sido propostas pela literatura científica e não-científica para os investimentos em pesquisa neste segmento. A principal justificativa associada à adoção de VATs baseia-se na possibilidade de redução de acidentes de trânsito ao eliminar a condução humana. Acidentes de trânsito são causados, na maior parte dos casos, por fatores de imperícia, imprudência ou negligência por parte do condutor humano (Benenson, 2009). Acidentes de trânsito (incluindo os diversos tipos de veículos e vítimas envolvidos) estão entre as dez maiores causas de morte no mundo de acordo com a Organização Mundial de Saúde, sendo que para o ano de 2010 ocorreram cerca de 1,24 milhões de mortes decorrentes do trânsito no mundo, sendo que metade dos acidentes envolveram “usuários vulneráveis”, isto é, pedestres, motociclistas e ciclistas (WHO, 2013). No Brasil, os acidentes de trânsito são o principal fator de óbito e de ferimentos por causa externa: entre os anos de 1996 e 2010 foram registrados mais de meio milhão de mortes nos diversos tipos de acidentes de trânsito, com cerca de 40 mil mortes por ano e taxa de mortalidade de 21,5 por 100 mil habitantes no

ano de 2010 (Waiselfisz, 2012). Com a redução de acidentes, é também possível reduzir os custos financeiros e materiais envolvidos que podem incluir serviços médicos para remoção e tratamento de feridos, atendimento policial, correção da infraestrutura de transportes, dano ao mobiliário urbano e à propriedade de terceiros, processos judiciais, entre outros. Não há, porém, estudos ou número de VATs suficientes até a presente data que permitam validar que a condução autônoma possa realmente minimizar a possibilidade de acidentes.

Sob a visão do condutor, apresenta-se como motivação a possibilidade de relevar limitações físicas (por exemplo deficiência visual, auditiva, motora), mentais (por exemplo embriaguez) ou sociais (por exemplo menoridade, velhice, inimizabilidade) que, normalmente, impeçam seus portadores de conduzirem de forma temporária ou permanente a um veículo conforme as recomendações do Conselho Nacional de Trânsito (Brasil, 2012). A automação da condução veicular também poderia permitir a redução do processo de treinamento teórico e prático de condutores de veículos que, no Brasil, totaliza um mínimo de 45 aulas/hora (Brasil, 2004). Outra motivação inclui a possibilidade de aumento da produtividade da população: de acordo com estudo realizado pelo Conselho Nacional das Indústrias (CNI) em grandes cidades o tempo gasto no trânsito é de 64 minutos/habitante/dia (CNI, 2012). Com a automação da condução, este tempo pode ser direcionado para outras atividades convenientes ao condutor a serem realizadas durante o período de navegação. Este ganho de produtividade pode ser incrementado com ações aderentes ao projeto do VAT como a capacidade de estacionamento automático e o acionamento remoto de ações do veículo utilizando dispositivos móveis.

Sob o aspecto das vias e do sistema de transporte, a principal motivação baseia-se na capacidade do VAT e dos seus sensores embarcados reconhecerem os elementos estáticos e dinâmicos do ambiente de forma mais adequada, consistente e completa do que a capacidade humana. Desta forma, as ações apropriadas de navegação podem ser selecionadas e gerenciadas de forma mais lógica, permitindo obedecer de forma estrita à legislação de trânsito, aumentar a velocidade média de navegação, distribuir de forma homogênea o tráfego de veículos, minimizar possíveis eventos extraordinários que impactem negativamente sobre o fluxo de veículos e agregar inteligência a situações-problema nas quais o veículo esteja inserido (como falta de sinalização, acidentes e ambientes com condições adversas de navegação).

Sob o aspecto do veículo, considera-se que a automatização do controle veicular permita garantir e aumentar a integridade do veículo ao fazer uso racional dos seus recursos para atender a uma determinada missão. Como a navegação autônoma busca tomar decisões apropriadas de acordo com os recursos disponíveis ao veículo, este deve ser capaz de monitorar permanentemente o desgaste dos seus componentes; o consumo e nível de energia; a temperatura interna e externa ao veículo; a integridade e responsividade dos diversos sistemas do veículo; entre outros. Os VATs poderão, então, se beneficiar pela maior durabilidade de seus componentes, minimizando manutenções emergenciais e reduzindo o impacto das ações do veículo sobre o ambiente.

2.2. Problemas e aspectos negativos da adoção de VATs

A literatura científica raramente menciona aspectos negativos possíveis da adoção de VATs, ainda que parte destes aspectos seja responsável pelas pesquisas com VATs não serem ainda mais difundidas. Os principais aspectos negativos envolvem a aceitação deste tipo de veículo

por parte do público geral e a integração de veículos altamente tecnológicos com a infraestrutura de transportes. Porém outros fatores devem ser reconhecidos e tratados para tornar viável a construção de VATs.

O primeiro problema envolve definir responsabilidades legais sobre os eventos consequentes das ações de um VAT. Ainda que um veículo autônomo apresente a possibilidade de reduzir acidentes produzidos por seres humanos e pelos eventos do ambiente, não há garantias que o VAT consiga tratar de forma segura a todas as condições adversas do ambiente e da própria estrutura do veículo, o que inviabiliza tornar o VAT completamente responsável pelo gerenciamento de navegação. Uma solução é estabelecer que, mesmo que o veículo seja autônomo, o ser humano ainda possa interferir no controle do veículo. Esta solução, no entanto, elimina ou restringe diversos benefícios anteriormente definidos sob a visão do condutor e possibilidade de redução dos acidentes de trânsito, pois exige o monitoramento constante de um ser humano imputável, com capacidade de discernimento e mobilidade adequada para tomar uma decisão de emergência mesmo em uma navegação autônoma. Como ações do veículo ou do ser humano podem ser conflitantes, é necessário estabelecer uma hierarquia de prioridade de ações e determinar em quais situações o ser humano ainda é responsável por ações, mesmo autônomas, do veículo.

O segundo problema relaciona-se ao aspecto psicológico do usuário de um VAT: um veículo deste tipo não deve apenas tratar de forma conservadora os aspectos de segurança e confiabilidade, mas também aparentar possuir estes fatores. Isto é importante para que o condutor possa aceitar sem reservas a utilização dos recursos da navegação autônoma e não necessite monitorar constantemente as variáveis de controle do veículo, o que anularia os benefícios da condução autônoma. Uma possível solução é a adoção de um sistema de mensagens e alertas de diferentes níveis de prioridade que possam avisar aos usuários do veículo.

O terceiro problema é associado às alterações da legislação de trânsito que permitam aceitar VATs. A legislação do trânsito no Brasil, por exemplo, é regulada pelo CTB que define um conjunto de normas legais resultado de estudos técnicos e decisões políticas no nível do Governo Federal. Esta legislação, no entanto, pode possuir acréscimos decorrentes de necessidades técnicas e administrativas no nível estadual e municipal. Isto significa que a legislação de trânsito aplicada a uma região administrativa (cidade ou estado) pode não ser igual a uma legislação aplicada a outra região. Para adoção dos VATs, as regras de trânsito deverão ser transformadas em um conjunto padronizado, lógico e altamente técnico de instruções que possa ser reconhecido pelo veículo e que possa ser manipulado por atender necessidades de diferentes legislações de trânsito.

O quarto problema envolve determinar como devem ser tratados veículos especiais como ambulâncias, carros policiais, veículos militares, veículos de autoridades governamentais, entre outros. Os usuários destes tipos de veículos necessitam, em diversas situações, transgredir normas de trânsito convencionais para realização de suas atividades, geralmente específicas e que não podem ser tratadas computacionalmente (como infringir uma sinalização específica ou andar na contramão de trânsito). Veículos especiais, desta forma, não podem adotar a navegação autônoma para parte de suas atividades.

O quinto problema envolve o aumento do custo de aquisição e manutenção de VATs: a eficácia de navegação autônoma é dependente da integração de diversos sensores, atuadores e dispositivos computacionais que devem atender requisitos de redundância, disponibilidade e segurança com maior custo financeiro para adoção e manutenção. Para minimizar este

problema, uma possível solução é a instrumentação da via de transportes com tecnologias que forneçam elementos já processados para o veículo, diminuindo a necessidade de tecnologia embarcada e processamento interno à estrutura do veículo.

O sexto problema é que VATs devem lidar com vias não-legalizadas, vias não mapeadas ou com infraestrutura inadequada/inexistente, o que pode tornar o custo de processamento computacional inviável para permitir navegação autônoma. Nestes ambientes, a condução humana pode ser mais adequada do que a condução autônoma ainda que ações pontuais de navegação (como controle de velocidade, ações automáticas em congestionamentos, entre outras ações) possam ser tratadas autonomamente em uma condução semiautônoma.

3. HISTÓRICO DOS VATs

3.1. Histórico dos VATs sob o contexto dos ITS

O evento pioneiro para as pesquisas em automação de veículos é situado no ano de 1939, com a realização da Feira Mundial de Nova Iorque, nos Estados Unidos da América (EUA). Nesta feira, a exposição Futurama, patrocinada pela empresa General Motors Corporation (GM) e projetada por Norman Melancton Bel Geddes, demonstrava como seria o mundo em vinte anos (isto é, até os anos de 1959-1960), sendo exibido um protótipo de sistema de rodovias automatizado, onde as estradas corrigiriam as falhas de condução humanas, impedindo ações que não pudessem ser realizadas. A possibilidade de criação das estradas foi discutida por Geddes e o então presidente dos EUA, Franklin Delano Roosevelt, porém não houve continuidade da proposta e nos anos de 1940, os esforços de pesquisa dos grandes fabricantes de automóveis foram direcionados para produção militar na Segunda Grande Guerra Mundial (Life, 1939; Geddes, 1940; Wetmore, 2003).

Com o término da Segunda Grande Guerra Mundial, diversas tecnologias desenvolvidas para fins militares (como o radar) foram adaptadas para automatizar e aumentar os recursos de navegação em veículos diversos. Na década de 1950, as empresas GM e a Radio Corporation of America (RCA) iniciaram, em conjunto, o desenvolvimento de tecnologias que aperfeiçoassem e automatizassem a condução de carros: o primeiro produto, em 1953, foi o modelo em escala de um sistema rodoviário automatizado para testes e, no mesmo ano, foi iniciada a produção de uma série de três carros-conceito, chamados Firebird, para demonstração de novas tecnologias desenvolvidas. Desta série de carros-conceito, o Firebird II foi apresentado como um projeto de carro tecnológico que incluía um sistema de condução automática na qual um fio enterrado na estrada enviaria sinais para o veículo e um sistema de comunicação via rádio com torres de controle (Temple, 2006). O veículo, no entanto, não aplicava realmente a condução autônoma. A primeira demonstração de condução automatizada ocorreria apenas em 1958: esta condução utilizava um cabo elétrico enterrado no solo, cuja corrente alternada era percebida por bobinas magnéticas localizadas na parte frontal do veículo (Wetmore, 2003).

Em 1964, a GM patrocinou uma nova Feira Mundial em Nova Iorque e apresentou uma atualização de sua visão de futuro para o sistema de transporte. Nesta visão, uma torre de controle operaria a direção, freios e velocidade de cada veículo em uma pista automática e grupos de carros se moveriam em intervalos iguais (Wetmore, 2003).

Até os anos de 1980, não houve alterações significativas nas pesquisas em automação da

condução. Nesta década, um conjunto de engenheiros da GM produziu um relatório para a *Federal Highway Administration* em que exploraram as possibilidades e benefícios de um sistema automatizado de vias. Este relatório permitiu a formação em 1986 de uma iniciativa chamada de “Mobilidade 2000” com o objetivo de iniciar um plano de adoção de sistemas inteligentes de transporte. Baseado na iniciativa, o Departamento de Transportes dos EUA (DOT) formou a *Intelligent Vehicle-Highway Systems America* (IVHS America), cujo nome foi modificado posteriormente para *Intelligent Transportation Systems America* (ITS America) (Gage, 1995; Wetmore, 2003; Sussman, 2005).

Atualmente, os Sistemas Inteligentes de Transportes desenvolvem recursos e tecnologias segmentadas em duas grandes áreas gerais: os sistemas de gerenciamento de viagens (*Advanced Traffic Management Systems* - ATMS) e sistemas avançados de informação ao motorista (*Advanced Traveller Information Systems* - ATIS) (Sussman 2005). Ambos os sistemas estão intimamente ligados com as tecnologias necessárias para o desenvolvimento de VATs.

3.2. Histórico dos VATs sob o contexto da Robótica Móvel

A aplicação da abordagem robótica para construção de carros autônomos teve início nos anos de 1960, oriunda das pesquisas em robótica móvel, campo da robótica com o objetivo de criar dispositivos automáticos com capacidade de movimento. Estas pesquisas tinham como objetivo desenvolver veículos controlados remotamente 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 tarefas domésticas, desarmamento de explosivos, socorro emergencial de ambientes de difícil acesso, entre outros (Choset *et al.*, 2005; Secchi, 2008).

Autonomia em Robótica Móvel designa a capacidade de um robô interagir com o ambiente e realizar suas ações com seus próprios recursos, sem a necessidade de intervenção humana. No final dos anos de 1960 apareceram os primeiros esforços para prover autonomia para robôs capazes de movimento sobre superfície: entre 1966 e 1972 foi desenvolvido o robô Shakey pelo Centro de Inteligência Artificial do Instituto de Pesquisa de Stanford (SRI) sob financiamento da Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Shakey era uma plataforma robótica sobre rodas, equipada com uma câmera de TV estéreo, um telêmetro (instrumento para medir distâncias em tempo real), sensores ultrassônicos e sensores de toque, enviando dados por radiofrequência para um computador *mainframe*. O computador recebia os dados captados pelos sensores, realizando o planejamento de rota e de ações necessárias a serem realizadas no ambiente, reenviando ao veículo as instruções necessárias para navegação. Na época, Shakey foi considerado um fracasso já que nunca conseguiu atingir a plena autonomia. Porém estabeleceu as bases que serviram para o desenvolvimento das pesquisas futuras em navegação autônoma (Nilsson, 1969; 1984; Gage, 1995).

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 sistema permitia detecção de obstáculos e seguimento de linhas brancas no solo (Tsugawa, 1994; Benenson, 2009).

Na década de 1980, o engenheiro aeroespacial alemão Ernst Dickmanns (considerado “o pioneiro do carro autônomo”) e sua equipe da Universität der Bundeswehr München, 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 comandos computacionais. O veículo podia, de forma autônoma, atingir até 100 km/h em vias sem tráfego (Broggi *et al.*, 1999).

Em 1987, as empresas japonesas Fujitsu e Nissan desenvolveram o *Personal Vehicle System* (PVS), um sistema baseado em visão computacional e aplicada em um micro-ônibus. O PVS baseava-se em um conjunto de câmeras estéreo, processador de imagens e computadores de controle que permitiam detectar marcações na pista, detecção de obstáculos (Tsugawa, 1994).

Entre os anos de 1987-1995, diversos grupos de pesquisas europeus (entre os quais as equipes de Ernst Dickmanns, da BMW, da Daimler-Benz e da Jaguar) uniram esforços para desenvolvimento do projeto EUREKA Prometheus (*PROgramme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety*) com o intuito de tornar mais eficiente o tráfego urbano na Europa. Dentre as diversas pesquisas, em 1994, Dickmanns apresentou um 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 Autobahn alemã e executando uma série de manobras que permitia ultrapassar outros veículos (Dickmanns *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 de pesquisa para todos os grupos de pesquisa italiano envolvidos com o projeto EUREKA. Com o encerramento do projeto, o VisLab segmentou-se em outros projetos entre os quais destaca-se o projeto ARGO desenvolvido entre 1997-2001 pela Universidade de Parma. Tratava-se de 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 por uma distância de 2000 km por seis dias, com velocidade média de 90 km/h e 94% do tempo em modo autônomo (Broggi *et al.*, 1999).

Na década de 1980, a DARPA iniciou as pesquisas com o *Autonomous Land Vehicle* (ALV), baseadas nas técnicas oriundas do desenvolvimento do robô Shakey. O ALV era um protótipo de veículo que possuía radar, visão computacional e mecanismo de controle robótico. As primeiras demonstrações em 1985 atingiam velocidade máxima 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 tem construído 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, 2005; CMU, 2013).

Nos anos de 1990, o Governo dos EUA financiou três projetos conhecidos como Demo I e III (pelo exército dos EUA) e Demo II (pelo 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 *et al.*, 2007).

Em Julho de 2002, o DARPA lançou o evento Grand Challenge, uma competição para estimular a pesquisa em navegação para veículos terrestres não tripulados por parte de empresas e organizações de pesquisa (Ozguner *et al.*, 2007). A primeira competição foi realizada em 13 de março de 2004, com o prêmio de US\$ 1 milhão e tinha como objetivo navegar 228 km, sem intervenção humana em, no máximo, 10 horas. A escolha do cenário deveu-se às grandes variações do terreno, alta quantidade de sujeira, curvas sinuosas e pequena fração de estradas pavimentadas. Esta competição teve 107 equipes inscritas, sendo que 15 efetivamente correram, mas nenhum dos participantes navegou mais do que 5% de todo o percurso (Thrun *et al.*, 2006).

O desafio foi repetido em 8 de outubro de 2005, com o prêmio de US\$ 2 milhões. Desta vez, 195 equipes foram inscritas e 23 efetivamente correram. Destas, cinco equipes conseguiram finalizar a corrida e o robô da Universidade de Stanford chamado Stanley foi considerado o campeão, finalizando o percurso em 6 horas, 53 minutos e 08 segundos. Stanley foi produzido por uma equipe de pesquisadores de Stanford, da Intel Research, da Volkswagen e de outras entidades. Tratava-se de um Volkswagen Touareg R5 TDI com uma plataforma com seis processadores Intel e um conjunto de sensores e atuadores para navegação autônoma. O *software* do veículo não era centralizado, sendo os módulos executados de forma paralela e sem sincronismo, sendo integrados pela utilização de marcas temporais sobre os dados. Isto permitiu reduzir o risco de impasses e atraso de processamento (Thrun *et al.*, 2006).

Em 03 de novembro de 2007 foi realizada a terceira versão da competição do DARPA, sob o nome de DARPA Urban Challenge. A mudança de nome ocorreu devido à alteração do cenário de provas, agora em um ambiente urbano simulado. Aos competidores foi fornecido um mapa digital das ruas do ambiente urbano e a missão a ser executada na forma de arquivos *Road Network Description File* (RNDF) e *Mission Definition File* (MDF). Durante o desafio, os veículos receberam missões diferenciadas, permitindo situações nas quais os veículos, executando objetivos e ações diferenciadas, deveriam obedecer a leis de trânsito e interagir entre si para garantir a coexistência (Montemerlo *et al.*, 2009). O evento final contou com onze veículos, sendo vencedor o veículo Boss da Universidade Carnegie Mellon: o veículo possuía um sistema de controle integrado a um conjunto de sensores *laser*, radares e câmeras, sendo capaz de reconhecer regras de trânsito, detectar outros veículos, realizar seguimento de veículos a uma distância segura, entre outras funções (Urmson *et al.*, 2007).

A Tabela 1 apresenta uma lista em ordem histórica das principais pesquisas robóticas relacionadas aos VATs.

Tabela 1-Principais pesquisas robóticas relacionadas aos VATs

Nome do Veículo	Grupos de pesquisa	Ano	Velocidade de navegação em modo autônomo
Shakey	SRI (EUA)	1966-1972	-
Veículo Inteligente	Universidade de Tsukuba (Japão)	1977	Velocidade máxima de 30 km/h

Nome do Veículo	Grupos de pesquisa	Ano	Velocidade de navegação em modo autônomo
VaMoRs	Universität der Bundeswehr München (Alemanha)	1985	Velocidade máxima de 100 km/h
PVS	Nissan e Fujitsu (Japão)	1987	Velocidade máxima de 60 km/h
VaMP	Universität der Bundeswehr München (Alemanha)	1994	Velocidade máxima de 130 km/h
VaMoRs-P	Universität der Bundeswehr München (Alemanha)	1995	Velocidade máxima de 160 km/h
ARGO	Universidade de Parma (Itália)	1997-2001	Velocidade máxima de 123 km/h
ALV	DARPA	Década de 1980	Velocidade máxima entre 3 km/h (1985) a 21 km/h (1987)
NavLab	Laboratório de Navegação- Universidade Carnegie Mellon	1984- atualmente	Velocidade máxima entre (NavLab1) 32 km/ a 144 km/h (NavLab 5)
Stanley	Universidade de Stanford	2005	Velocidade limitada a 80 km/h devido às exigências do DARPA Grand Challenge
Boss	Universidade Carnegie Mellon e GM	2007	Velocidade média de 22 km/h

3.3. Pesquisas em VATs no Brasil

No Brasil, até o ano de 2013, há poucos grupos de pesquisas acadêmicos, governamentais e empresariais sobre carros robóticos. Em geral, pesquisas restritas são realizadas pelos grupos de pesquisa em robótica, existindo, no entanto, poucos grupos com foco em construção de carros robóticos para transporte humano. Quatro grupos de pesquisa têm desenvolvido aplicações específicas em carros robóticos: o Laboratório de Sistemas de Computação e Robótica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CORO-UFMG), o Laboratório de Robótica Móvel da Universidade de São Paulo – Campus São Carlos (LRM-USP), o Laboratório de Computação de Alto Desempenho da Universidade Federal do Espírito Santo (LCAD- UFES) e o Laboratório de Topografia e Geodésia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LTG-EPUSP). Destes grupos, três (CORO-UFMG, LRM-USP e LCAD-UFES) possuem um enfoque nos aspectos robóticos do veículo e um (LTG-EPUSP) possui o enfoque nos aspectos de Geomática e Engenharia de Transportes envolvidos no projeto de um carro robótico.

As pesquisas do CORO-UFMG são consideradas as mais antigas em desenvolvimento no país, tendo iniciado em 2007 e sendo realizadas pelo Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento

de Veículos Autônomos (PDVA). O objetivo do grupo é desenvolver ferramentas robóticas para instrumentação, navegação e controle embarcados para veículos terrestres e aéreos, autônomos ou semiautônomos. O grupo desenvolveu o CADU (Carro Autônomo Desenvolvido na UFMG), um automóvel integrado a um conjunto de componentes tecnológicos para navegação autônoma. Uma lista dos trabalhos do grupo pode ser visualizada em <http://coro.cpdee.ufmg.br/>.

O LRM-USP, laboratório integrante do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos (INCT-SEC), tem desenvolvido desde 2010 aplicações robóticas para uso agrícola e para navegação urbana. O projeto CaRINA (Carro Robótico Inteligente para Navegação Autônoma) envolve a construção de um veículo desenvolvido para navegação urbana utilizando técnicas de localização, mapeamento e estratégia de movimento utilizando recursos da robótica móvel. Uma lista de trabalhos desenvolvidos pelo grupo está em <http://www.lrm.icmc.usp.br>.

As pesquisas do LCAD-UFES, realizado em parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), tem como objetivo o desenvolvimento de carros robóticos utilizando recursos matemáticos-computacionais para resolução de problemas de processamento de alto desempenho, mapeamento e localização. Uma lista de trabalhos desenvolvidos pelo grupo é apresentada em <http://www.lcad.inf.ufes.br/>.

As pesquisas do LTG-EPUSP são realizadas pela Equipe do Veículo Autônomo do Grupo de Investigação em Geomática Aplicada à Engenharia (EVA- GIGA), grupo iniciado em 2011, cuja proposta é a criação de ferramentas e recursos para navegação autônoma sob enfoque da Geomática e da Engenharia de Transportes. Os trabalhos do grupo estão disponíveis em <http://www.teses.usp.br/>.

4. ESTADO DA ARTE EM VAT

Ainda que VATs não estejam disponíveis para uso geral até a data de setembro de 2013, veículos autônomos em ambientes controlados e diversos componentes tecnológicos de automatização de ações específicas de condução veicular já estão disponíveis ao grande público (Ozguner *et al.*, 2007). Entre os principais recursos aderentes aos aspectos de autonomia dos VATs estão sistemas como *cruise control* (sistema que mantém a velocidade de condução de um veículo de forma previamente programada), *Anti-Lock Breaking System* (sigla ABS - sistema de frenagem que evita que a roda trave e entre em derrapagem), *Automatic Parking* (estacionamento automático do veículo utilizando sensores), sistemas anti-colisão (que utilizam sensores como radar, laser ou câmeras para detectar uma colisão iminente, permitindo avisar ao condutor), entre outros.

Paralelamente, diversos outros grupos de pesquisa, montadoras e empresas têm investido recursos para pesquisa em veículos semiautônomos e completamente autônomos. As principais pesquisas baseiam-se na adoção de diferentes tipos de sensores que ampliam a capacidade de monitoramento do ambiente em que o veículo está inserido e pela adoção de sistema de controle computacional que realizam ações globais ou locais, provendo automação e autonomia em momentos específicos (Ozguner *et al.*, 2007).

Destas pesquisas, aquela de maior destaque para a navegação autônoma é o projeto Google Car, um conjunto de veículos robóticos desenvolvidos desde 2010 pela empresa estadunidense Google Incorporation. Os veículos integram um conjunto de sensores (incluindo radares, câmeras e receptores GPS) e técnicas de localização baseada em uma base

de dados com mapas muito detalhados do terreno (facilitando a localização e permitindo que a leitura de GPS não seja feita de forma contínua), sendo o componente central do sistema um telêmetro a *laser* instalado sobre o teto do veículo, que gera um mapa tridimensional do ambiente. Para navegar em um ambiente, o veículo é guiado por seres humanos pelo ambiente uma ou mais vezes para coleta de dados. 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. Nestes estados, veículos autônomos podem ser utilizados para testes de navegação autônoma nas vias de transporte, porém exige-se que um condutor humano permaneça no veículo e possa intervir em situações emergenciais (Guizzo, 2011; Muller, 2012; Pinto, 2012).

O projeto-conceito EN-V (*Electric Networked - Vehicle* - Veículo Elétrico em Rede), desenvolvido pela empresa GM desde 2010, é um veículo elétrico de dois lugares, com foco em mobilidade urbana, que integra recursos de GPS, sensores e comunicação entre veículos, possuindo a capacidade de detectar e evitar obstáculos e ser chamado por um *smartphone*, assim como de comunicar-se com outros veículos, organizando comboios e combinando ações (Mitchell *et al.*, 2010).

Entre 2009-2012, a Comissão Europeia financiou o projeto *Safe Road Trains for the Environment* (SARTRE), um consórcio de empresas que inclui a Volvo, para investigar tecnologias para automação de condução envolvendo o conceito de “autoestradas de trem”: estas autoestradas aplicam o conceito de comboios lógicos, onde um conjunto de até oito veículos é conectado via rede de comunicação sem fio a um veículo condutor controlado por um motorista profissional. Esta tecnologia não exige modificação em vias, utilizando sensores e tecnologias já embarcados no veículo para realizar a conexão com um veículo condutor e permitir a comunicação inter-veículos (Dávila e Nombela, 2010; Robinson e Chan, 2010).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ainda que a pesquisa em veículos autônomos terrestres de transporte seja um campo de pesquisa em ampla expansão e a literatura científica apresente justificativas diversas para seu desenvolvimento, problemas preeminentes devem ser tratados para garantir a sua adoção de forma massificada. Dentro do contexto apresentado, veículos autônomos ainda podem exigir a supervisão humana na maior parte dos casos (o que não os torna plenamente autônomos), ainda que diversos eventos mais simples possam ser executados de forma automatizada (como estacionamento automático, controle automático de direção e velocidade em congestionamentos, etc.) o que já tem sido aplicado pelas diversas montadoras em seus veículos mais recentes. Esta automatização parcial já permite cumprir parte das principais motivações para condução autônoma como reduzir acidentes, melhorar a performance de navegação e tornar o trânsito mais inteligente. No entanto, esta abordagem ainda mantém o controle global e a responsabilidade legal sob administração do condutor, obrigando a este atender às mesmas exigências atualmente requisitadas de um condutor de veículo comum, além de exigir que o condutor de um VAT possua conhecimento especializado sobre como operar os componentes computacionais do veículo, o que pode aumentar (e não diminuir) o processo de treinamento de condução veicular.

As principais pesquisas em VAT têm enfatizado a instrumentação do veículo para que a

autonomia de controle seja plenamente independente do ambiente. Esta abordagem é realizada porque a instrumentação da via para torna-la mais inteligente e integrada a VATs pode ser complexa e de elevado custo financeiro e tecnológico. No entanto, sempre que possível, a instrumentação da via de transportes é recomendada pois pode oferecer recursos de processamento compartilhados que permitam minimizar os componentes e processamento a serem realizados localmente pelo veículo. Estes recursos podem incluir geração automática de rotas, posicionamento preciso, controle remoto da infraestrutura sobre o veículo em ambientes controlados (por exemplo, estacionamentos, rodovias, etc.), entre diversos outros elementos. A instrumentação da via, assim, pode permitir a construção de VATs mais simples em termos de arquitetura computacional e atender ao princípio da autonomia no controle do veículo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo investimento nas pesquisas realizadas pelo EVA-GIGA (Processo 402393/2009 – 0) e pelo auxílio financeiro de bolsa-mestrado (Processo 130019/2013-5).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benenson, R. (2009). *Perception pour véhicule urbain sans conducteur: Conception et implementation*. 2009. 218 f. Docteur de l'École des Mines de Paris. Paris Tech: Paris, France.
- Brasil (1997). Código Brasileiro de Trânsito. Lei 9503 de 23 de Setembro de 1997: Institui o Código de Trânsito Brasileiro, Casa Civil, Brasília, DF.
- Broggi, A.; Bertozzi, M.; Fascioli, A. e Conte, G.(1999). *Automatic Vehicle Guidance: The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Brasil (2004). Conselho Nacional de Trânsito. *Resolução Nº 168 de 14 de Dezembro de 2004*. Estabelece Normas e Procedimentos para a formação de condutores de veículos automotores e elétricos, a realização dos exames, a expedição de documentos de habilitação, os cursos de formação, especializados, de reciclagem e dá outras providências. Brasília, DF, 2004.
- Brasil (2012). Conselho Nacional de Trânsito. *Resolução Nº 425 de 27 de Novembro de 2012*. Dispõe sobre o exame de aptidão física e mental, a avaliação psicológica e o credenciamento das entidades públicas e privadas de que tratam o art. 147, I e §§ 1º a 4º e o art. 148 do Código de Trânsito Brasileiro. Brasília, DF, 2012.
- Choset, H.; Lynch, K.N.; Hutchinson, S.; Kantor, G.; Burgard, W.; Kavraki, L.E. e Thrun, S.(2005). *Principles of Robot Motion*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- CMU (2013). *No Hand Across America*. Carnegie Mellon University. Disponível em <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/tjochem/www/nhaa/nhaa_home_page.html>. Acesso em 30 de abril de 2013.
- CNI (2012). *Cidades: Mobilidade, Habitação e Escala*. Confederação Nacional das Indústrias: São Paulo, 2012.
- Dávila, A. e Nombela, M. (2010). SARTRE: SAFE Road TRains for the Environment. *In: Conference on Personal Rapid Transit PRT@LHR 2010*. Technical Paper.
- Dickmanns, E.D.; Behringer, R.; Dickmanns, D.; Hildebrandt, T.; Maurer, M.; Thomanek, F. e Schiehlen, J. (1994). The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. *Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium*. p.68-73.
- Gage, D.W. (1995) UGV History 101: A Brief History of Unmanned Ground Vehicle (UGV) Development Efforts. *In: Unmanned Systems Magazine*. v. 13, n. 3.
- Geddes, N.B. (1940). *Magic Motorways*. Random House Book, New York, NY, USA.
- Gonçalves, L. F. S. (2011). *Desenvolvimento de Navegação Autônoma por GNSS*. 2011. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Guizzo, E. (2011). 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 Maio de 2013.

- Life (1939). Lifes Goes To The Futurama. In: *Life*. 5 Jul. 1939.
- Mitchell, W.J.; Borroni-Bird, C. e Burns, L.D. (2010). *Reinventing the Automobile*. MIT Press: Cambridge, MA, USA.
- Montermelo, M.; Becker, J.; Bhat, S.; Dahlkamp, H.; Dolgov, D.; Ettinger, S.; Haehnel, D.; Hilden, T.; Hoffman, G.; Huhnke, B.; Johnston, D.; Huhnke, B.; Klumpp, S.; Langer, D.; Levandowski, A.; Levinson, J.; Marcil, J.; Orenstein, D.; Paefgen, J.; Penny, I.; Petrovskaya, A.; Pflueger, M.; Stanek, G.; Stavens, D.; Vogt, A. e Thrun, S. (2009). Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge. *The DARPA Urban Challenge: Springer Tracts in Robotics Advance*. v.56, p.91-123.
- Muller, J. (2012). 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/>>. Acesso em 30 de abril de 2013.
- Nilsson, N.J. (1969). A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques. *Proceedings of the First International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Washington, DC, USA.
- Nilsson, N.J. (1984). *Shakey The Robot*. Technical Note 323 AI Center, SRI International, Menlo Park, CA, USA.
- Ozguner, U.; Stiller, C e Redmill, K. (2007). Systems for Safety and Autonomous Behavior in Cars: The DARPA Grand Challenge Experience. *Proceedings of IEEE*. v. 95, n.2, p.397-412.
- Pinto, C. (2012). How Autonomous Vehicle Policy in California and Nevada Addresses Technological and Non-Technological Liabilities. *Intersect*. v. 5. n.1.
- Pomerleau, D. (1995). Ralph: Rapidly adapting lateral position handler. In: *IEEE Symposium on Intelligent Vehicles*. pp. 506 - 511.
- Robinson, T. e Chan, E. (2010) Operating Platoon On Public Motorways: An Introduction To The SARTRE Platooning Programme. In: *17th World Congress on Intelligent Transport Systems*. Busan, South Korea.
- Secchi, H.A (2008). *Una Introducción a los Robots Móviles*. Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina.
- Sussman, J.M. (2005). *Perspectives on Intelligent Transportation*. Springer, New York, NY, USA.
- Temple, D.W. (2006). GM's Motorama. Motorbooks: Minneapolis.
- Thrun, S.; Montermelo, M.; Dahlkamp, H.; Stavens, D.; Aron, A.; Diebel, J.; Fong, P.; Gale, J.; Halpenny, M.; Hoffmann, G.; Lau, K.; Oakley, C.; Palatucci, M.; Pratt, V.; Stang, P.; Stroband, S.; Dupont, C.; Jendrossek, L. E.; Koelen, C.; Markey, C.; Rummel, C.; van Niekerc, J.; Jensen, E.; Alessandrini, P.; Bradski, G.; Davies, B.; Ettinger, S.; Kaehler, A.; Nefian, A. e Mahoney, P. (2006). Stanley: The Robot that Won the DARPA Challenge. *Journal of Field Robotics*. n. 23(9), p.661-692.
- Tsugawa, S. (1994). Vision-based vehicles in Japan: Machine Vision Systems and Driving Control-Systems. *Ieee Transactions On Industrial Electronics*, 1994, v.41(4), pp.398-405.
- Urmson, C., Anhalt, J., Bagnell, D., Baker, C., Bittner, R., Dolan, J., Dug- gins, D., Ferguson, D., Galatali, T., Geyer, C., Gittleman, M., Harbaugh, S., Hebert, M., Howard, T., Kelly, A., Kohanbash, D., Likhachev, M., Miller, N., Peterson, K., Rajkumar, R., Rybski, P., Salesky, B., Scherer, S., Woo-Seo, Y., Simmons, R., Singh, S., Snider, J., Stentz, A., Whittaker, W. e Ziglar, J. (2007). *Tartan racing: A multi-modal approach to the darpa urban challenge*. Darpa Technical Report.
- Waiselfisz, J.J. (2012). *Mapa da Violência 2012*. Caderno Complementar 2: Acidentes de Trânsito. Instituto Sangari, São Paulo.
- Wetmore, J. (2003). Driving the Dream: The History and Motivations behind Sixty Years of Automated Highway Systems in America. *Automotive History Review*. Summer, 2003. pp. 4- 19.
- WHO (2013). *Global Status Report On Road Safety 2013*. World Health Organization: Geneva, Switzerland.

Rodrigo de Sousa Pissardini (pissardini@usp.br)

Daniel Chin Min Wei (daniel.wei@usp.br)

Edvaldo Simões da Fonseca Júnior (edvaldoj@usp.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, n° 83 - Cidade Universitária - São Paulo – SP - CEP: 05508-900