

GUIAMENTO AUTOMÁTICO DE AUTOCARROS. IMPACTES NOS REQUISITOS APLICÁVEIS À INFRAESTRUTURA

João Lourenço Cardoso ¹, Carlos Roque ¹, Paulo Morais ²

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Departamento de Transportes. Núcleo de Planeamento, Tráfego e Segurança, Av. do Brasil 10, 1700-066 Lisboa, Portugal.

email: jocardoso@lneec.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Centro de Instrumentação Científica, Núcleo de Sistemas Eletrotécnicos e Mecânicos, Av. do Brasil 10, 1700-066 Lisboa, Portugal

Sumário

A automação da condução de veículos rodoviários tem sido apresentada como uma forma emergente de alteração profunda dos mercados do transporte de mercadorias e da mobilidade das pessoas, possibilitada pelos avanços tecnológicos.

Na presente comunicação apresentam-se noções básicas sobre guiamento automático de veículos rodoviários, referem-se os princípios fundamentais de conceção de interfaces homem-máquina aplicáveis a autocarros, que são relevantes para condutores e apresentam-se sumariamente os resultados do levantamento das soluções existentes para guiamento automático de autocarros, efetuado no âmbito da avaliação da viabilidade da instalação de um sistema de transporte público rodoviário em canal próprio, estreito e com traçado sinuoso.

Palavras-chave: Guiamento automático de veículos / Acostagem de precisão / Guiamento óptico / Infraestrutura

1 INTRODUÇÃO

No âmbito do estudo da viabilidade da instalação de um sistema de transporte público rodoviário em canal próprio, foram inventariados os requisitos técnicos, ao nível da infraestrutura, necessários à implementação de um sistema de guiamento automático eletrónico num trecho estreito e de traçado sinuoso. Da pesquisa bibliográfica realizada foi possível identificar alguns sistemas de transporte público rodoviário de passageiros utilizando sistemas de guiamento eletrónico em regime de exploração aberto, com carácter efetivo ou experimental. Estes sistemas baseiam-se genericamente no seguimento de marcas aplicadas ao nível da infraestrutura, podendo ser subdivididos em dois grandes grupos de acordo com o princípio físico: guiamento magnético e guiamento óptico. Verificou-se que o sistema de guiamento magnético, apesar de validado com sucesso através de demonstração de um protótipo em ambiente operacional – *Technology Readiness Level (TRL) 7* – não foi aplicado comercialmente. Relativamente ao guiamento automático óptico (GAO), apenas foi possível identificar e analisar um sistema, validado e em uso em ambiente operacional (TRL 9), apesar de haver notícias na internet acerca do desenvolvimento e teste de sistemas em ambiente operacional, levados a cabo por fabricantes de autocarros de referência.

Na presente comunicação apresentam-se noções básicas sobre guiamento automático de veículos rodoviários, referindo-se os princípios fundamentais, genéricos, de conceção (*design*) de interfaces homem-máquina, aplicáveis a autocarros. São, igualmente, apresentados sumariamente os resultados do contacto com as soluções atualmente existentes para guiamento automático de autocarros, enquadrando-as no contexto do canal em causa e salientando-se os requisitos específicos da infraestrutura rodoviária para acomodar a circulação de autocarros conectados e com guiamento automático. A relevância destes requisitos no caso de outras aplicações de autocarros com apoio automático à condução em sistemas de transporte rodoviário de passageiros em canal próprio carece de validação, em termos de abrangência e de pertinência, assunto que é abordado a finalizar.

2 GUIAMENTO AUTOMÁTICO DE VEÍCULOS RODOVIÁRIOS

A automação da condução de veículos rodoviários (parcial ou, mesmo, total) tem sido apresentada como uma forma emergente de alteração profunda dos mercados do transporte de mercadorias e da mobilidade das pessoas, possibilitada pelos avanços tecnológicos. No cenário mais favorável a automação e os sistemas de transporte inteligentes (ITS) permitirão otimizar a operação das redes de estradas existentes, melhorar os fluxos de tráfego e reduzir o congestionamento, bem como diminuir a poluição e o consumo de combustível [1, 2].

Também é frequentemente afirmado que a condução automática tem o potencial para melhorar significativamente a segurança rodoviária, contribuindo decisivamente para eliminar os acidentes graves ou fatais [3]. Este argumento baseia-se nas estimativas de haver envolvimento de erros humanos em mais de 90% dos acidentes rodoviários [4] e no pressuposto de a automação permitir transferir a tarefa de condução para um subsistema isento de erros, menos sujeito ou, até, mesmo livre do risco de colisões. Há, no entanto, consideráveis incertezas acerca da efetiva verificação de todos os fatores necessários para a concretização do sistema de transporte completamente automatizado idealizado. Em documento recente elaborado pelo *Forum of European Road Safety Institutes* (FERSI) são elencados quatro grandes conjuntos de preocupações a atender para garantir que a condução autónoma não hipoteque o desiderato de melhoria de segurança rodoviária [5]:

- Quais as condições a atender e quais as ações a realizar para que a condução automática e conectada e os ITS possam melhorar a segurança rodoviária?
- Quais os problemas de segurança rodoviária que mais provavelmente não serão resolvidos pela condução automática e os ITS? Em especial, que grupos de utentes rodoviários dificilmente poderão beneficiar da condução automática e dos ITS, se as linhas presentemente seguidas na conceção desses novos sistemas não forem alteradas?
- Que problemas de segurança rodoviária específicos poderão ser causados pela condução automática, pela conectividade ou pelos ITS e que ações podem ser realizadas para os evitar?
- Que adaptações devem ser introduzidas nos métodos de teste, de certificação e de validação de sistemas de transporte rodoviário e como podem ser identificados os sistemas de condução automática ou de ITS com melhor desempenho?

De acordo com a taxonomia definida pela SAE [6], a tarefa de condução compreende funções desenvolvidas a três níveis (estratégico, tático e operacional), esquematicamente representados na Figura 1. Aqueles níveis correspondem aos descritos em Cardoso [7] e aí designados por navegação, guiamento e controlo, respetivamente.

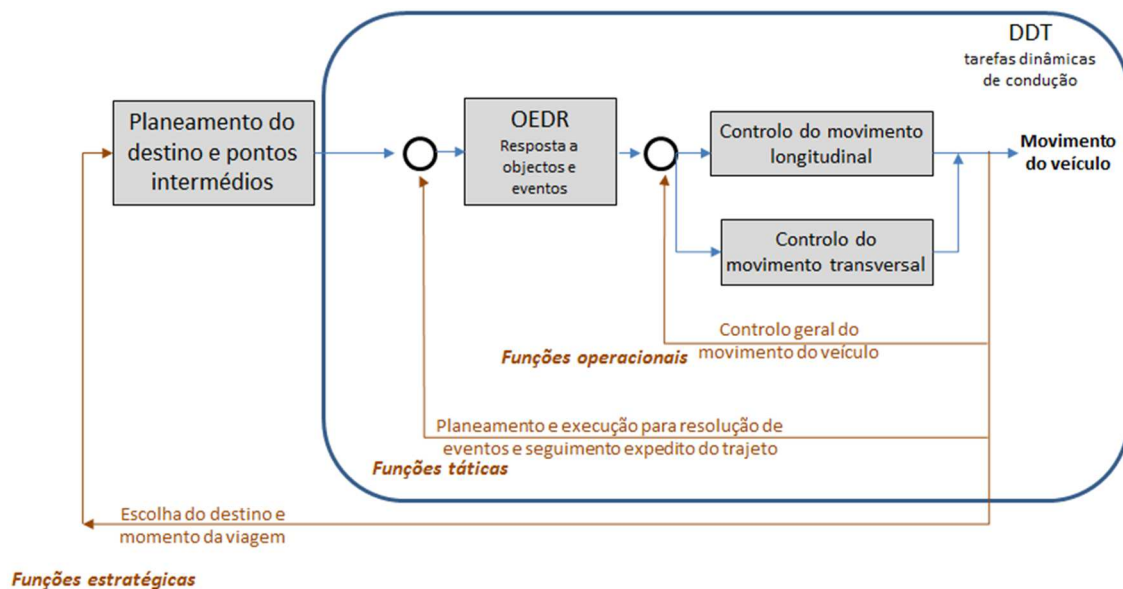


Figura 1. Representação esquemática da tarefa de condução (adaptado de [6])

No mesmo documento agrupam-se sob a designação de tarefas dinâmicas da condução (*Dynamic Driving Tasks – DDT*) as ações desenvolvidas ao nível do guiamento e controlo, para conduzir um veículo no tráfego rodoviário, designadamente para controlo transversal (através do volante) e longitudinal (mediante acelerador e travão) do movimento do veículo, supervisão da situação de tráfego envolvente (com deteção de objetos e eventos e preparação de respostas), execução das ações de resposta às situações encontradas, planeamento de manobras, comunicação com o restante tráfego (por exemplo, a sinalização de manobras) e melhoria das condições de circulação (designadamente a limpeza do para-brisas e o acionamento da iluminação, para aumentar a conspicuidade ou a visibilidade).

Na versão de 2016 da norma sobre este assunto, são definidos seis níveis de automação da condução [6], em função do grau de intervenção de automatismos no guiamento e aceleração, na supervisão da situação envolvente, e na escolha de alternativas da dinâmica de condução (Figura 2), denominados pela respetiva ordenação.

| Nível | Designação | Tarefas dinâmicas da condução (DDT) | | Resposta ao desempenho nas tarefas dinâmicas da condução | Domínio Operacional do projeto do sistema (ODD) |
|---|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| | | Guiamento e aceleração | Supervisão da situação envolvente | | |
| Conductor humano executa parte ou todas as tarefas dinâmicas da condução | | | | | |
| 0 | Sem automação | H | H | H | n/a |
| 1 | Apoio à condução | H e S | H | H | Alguns aspetos |
| 2 | Automação parcial | S | H | H | Alguns aspetos |
| Sistema de automação da condução executa todas as tarefas dinâmicas da condução (quando ativo) | | | | | |
| 3 | Automação condicionada | S | S | H | Alguns aspetos |
| 4 | Automação elevada | S | S | S | Alguns aspetos |
| 5 | Automação total | S | S | S | Todos os aspetos |

Figura 2. Níveis de automação da tarefa de condução (adaptado de [6])

Nos níveis 0 a 2 o condutor humano (H) executa todas ou apenas uma parte das tarefas dinâmicas da condução; nos níveis 3 a 5 existe um sistema (S) automático de condução (ADS) que executa todas as tarefas dinâmicas da condução, quando ativado. Desta forma, nos níveis 3 a 5, quando o ADS está ativado o condutor assume um papel de mero supervisor do funcionamento do sistema (Nível 3) ou de observador desse funcionamento (níveis 4 e 5).

Nos níveis 1 a 4 os sistemas automáticos de apoio à condução ou da automação desta são concebidos para um determinado domínio operacional de projeto do sistema (ODD), o qual corresponde ao campo de aplicação do sistema de automação (por exemplo, em autoestrada). É fundamental que os utilizadores dos veículos com estes níveis de automação saibam exatamente quais as fronteiras do ODD do seu veículo. Esta preocupação não existirá no Nível 5, uma vez que o ODD não está condicionado neste nível.

Outro aspeto importante na aplicação de automatismos à condução de veículos diz respeito à filosofia subjacente ao automatismo, ao papel do condutor e à relação entre ambos. Verifica-se não haver um consenso acerca da melhor forma de resolver este assunto, mesmo no caso do transporte aéreo, onde as preocupações de segurança da operação são encaradas de forma muito rigorosa. Assim, presentemente há duas abordagens muito diferentes: numa, o piloto é o juiz supremo nas operações aéreas, devendo o automatismo apoiar o piloto e não o podendo substituir; na outra, o automatismo deve melhorar o desempenho do avião e do sistema, mantendo a zona de voo sem trabalhar contra o operador, a não ser quando necessário por razões de segurança. No primeiro caso (típico, por exemplo, da Boeing), o automatismo é concebido de um modo que não impede o piloto de cometer erros, lapsos e infrações que originem incidentes; no segundo caso (característico da Airbus), o automatismo pode impedir um piloto altamente treinado e hábil de executar uma manobra necessária para evitar um incidente.

Nos níveis de automação 2 (*Autopilot* da Tesla e *Distronic Plus* da Mercedes) e 3 dos veículos automóveis, o papel do condutor no controlo do movimento transversal e longitudinal da viatura é transferido em graus variados ao sistema de automação; o condutor adquire um papel de condução intermitente, em que só por vezes assume o controlo do veículo. No entanto, é esperado que ele esteja em condições de readquirir o papel de condutor logo que tal seja solicitado pelo sistema de automação ou logo que surja alguma situação perigosa, ainda que esta não seja detetada pelo mencionado sistema de automação. Por este motivo, os aspetos relacionados com a transição da operação automática para a manual são fundamentais nestes níveis de automação (e também para os sistemas de Nível 1).

São particularmente relevantes a garantia de resposta oportuna a avisos para retoma do controlo da viatura bem como a manutenção de níveis adequados de vigilância do condutor enquanto mero operador, assegurando-se que sejam compatíveis com a deteção atempada de perigos dificilmente detetáveis pelo subsistema de automação. Nestas questões avulta a importância das interfaces homem-máquina (HMI), cuja conceção e projeto deve seguir um conjunto de princípios genéricos, que no caso específico dos carros (em que se admite que os condutores possam ter deficiências cognitivas leves não diagnosticadas ou pequenas deficiências físicas) podem ser agrupados em quatro categorias gerais [8]:

- Acessibilidade: capacidade do condutor para alcançar o HMI ou de o controlar mediante fala ou toque;
- Ergonomia (facilidade de uso): grau requerido de capacidades cognitivas humanas, bem como o tipo de dispositivos de entrada e saída;

- Funcionalidade: tipo de avisos emitidos, sistemas de orientação usados, recursos visuais, auxílios cognitivos e de atenção necessários;
- Adaptabilidade: aos requisitos e às capacidades individuais dos utilizadores.

Em estudo empírico realizado para a *National Highway Traffic Safety Administration* americana, Blanco *et al.* [9] realizaram experiências em simulador de condução compreendendo o alerta dos operadores-condutores para retomarem o controlo de veículos com nível de automação 2 e com nível de automação 3, bem como o pedido aos operadores-condutores para supervisionarem a estrada quando conduzidos por um veículo com nível de automação 2.

Assim, genericamente, aqueles autores concluíram que configurações diversas dos elementos da HMI podem ter um grande impacto na forma como os operadores interagem com veículos com nível de automação 2 ou 3 [9]. Igualmente verificaram que os participantes confiaram muito nas capacidades dos sistemas automatizados; essa confiança é essencial para a utilização generalizada dos sistemas mas teve inconvenientes, na medida em que foram observados participantes nos testes a dar prioridade a atividades não relacionadas com a condução (relativamente a outras incidindo no funcionamento do veículo), e a ignorar as solicitações para retoma da condução quando elas foram apresentadas.

Do estudo resultou, ainda, a recomendação para continuar a investigação para análise mais completa das questões abordadas, tendo em vista contribuir para otimizar os sistemas de HMI dos veículos com automação da condução. Apesar dessa recomendação, os autores consideraram que os padrões de compenetração dos condutores observados no estudo realizado são informação suscetível de ser usada para apoiar o estabelecimento de fundamentos de fatores humanos para o projeto de veículos com níveis de automação 2 e 3.

Banks *et al.* [10] realizaram experiências de condução de um veículo com automação de nível 2 (Tesla Model S a circular em modo Autopilot) durante 40 minutos em estradas britânicas. A análise da informação gravada em vídeo indica que os operadores-condutores não são convenientemente apoiados no cumprimento das responsabilidades de supervisão da envolvente rodoviária e, em resultado, têm um comportamento indiciador de complacência perante os perigos bem como excesso de confiança nas capacidades do sistema de automação.

Para Banks e Stanton [11] no nível de automação 2 é fundamental que as transições entre modos de operação sejam apenas entre Condutor Conduzindo (CC) e Condutor Supervisionando (CS), e vice-versa, para garantir que a segurança do sistema seja devidamente garantida. Para estes autores, no nível de automação 2 a transição entre Condutor Não Conduzindo (CNC) e CC é problemática pois neste nível o sistema de automação não é capaz de realizar todas as tarefas potencialmente necessárias. Ao assumirem um comportamento de CNC (em vez do desejado modo CS), os operadores-condutores acabam por ser expostos a mais riscos na estrada do que se não houvesse automação.

Acresce que se verificou também a ocorrência de situações de confusão quanto à identificação do modo de condução (manual ou automação) ativado, o que indicia incompreensão do funcionamento da HMI relevante. Após acionamento correto do *Autopilot*, a maioria dos condutores assumiu o modo CS.

Assim, Banks *et al.* [10] consideram que, embora possam ser delineadas estratégias para melhorar os sistemas de automação de nível 2 e 3, parece mais útil garantir que o condutor humano mantenha o controlo do movimento transversal ou do longitudinal (um deles, o que corresponde ao nível 1) ou, em alternativa, que o condutor humano seja completamente removido do subsistema de resposta ao desempenho das tarefas dinâmicas de condução (*DDT fallback*, para a SAE [6]). Para estes autores, confiar ao operador-condutor a última linha de defesa para as limitações de conceção e implementação da automação de nível 2 ou 3 é uma solução fraca.

Finalmente, faz-se menção aos estudos realizados em simulador de condução de autocarros, envolvendo condutores profissionais, realizados na Holanda [12]. Estes autores concluíram que a carta de condução emitida para condução convencional não deve ser validada incondicionalmente para a condução de veículos semi-automatizados.

3 SISTEMAS DE GUIAMENTO ÓPTICO DE AUTOCARROS EXISTENTES DETETADOS

Apenas foi identificado um conjunto de sistemas de guiamento em funcionamento comercial, concebido e desenvolvido pela Matra e Renault, no final da década de 1990, e atualmente comercializado pela Siemens em duas configurações a que correspondem designações diferentes [13]:

1. *Optiguide* – guiamento de precisão, mediante seguimento de linhas descontínuas duplas marcadas na superfície do pavimento.
2. *Optiboard* – guiamento de precisão, tecnicamente em tudo idêntico à designação *Optiguide*, apenas com uma mudança no nome, para efeitos comerciais, atendendo à vocação para acostagem automática e de precisão e orientada para operadores com dificuldades em atender aos requisitos dos regulamentos aplicáveis ao transporte guiado.

À data de elaboração do estudo do LNEC, os sistemas *Optiguide* e *Optiboard* estavam operacionais, sendo usados em diversas linhas de transporte público rodoviário de passageiros: Rouen, Clermont-Ferrand, Las Vegas, Castellón, Bolonha, Nîmes e Tóquio.

Genericamente o sistema funciona com base numa trajetória desejada definida mediante marcas colocadas na superfície do pavimento (linha axial descontínua dupla, ver Figura 3); na captação de imagens dessa linha nos 10 metros a jusante do veículo mediante uma câmara de vídeo e na medição dos ângulos de rotação da direção e das rodas dianteiras do autocarro e da respetiva velocidade; no processamento eletrónico das imagens captadas e da informação proveniente dos sensores de rotação, para verificação da conformidade à trajetória e programação das ações de guiamento a realizar para seguimento da trajetória desejada; e no acionamento do motor acoplado à coluna de direção do autocarro, para efetivação da manobra de guiamento calculada.

As marcas são detetadas através do seu contraste com a cor do pavimento, em fundo.

O desempenho global do sistema depende da infraestrutura e das especificações técnicas do autocarro [13].

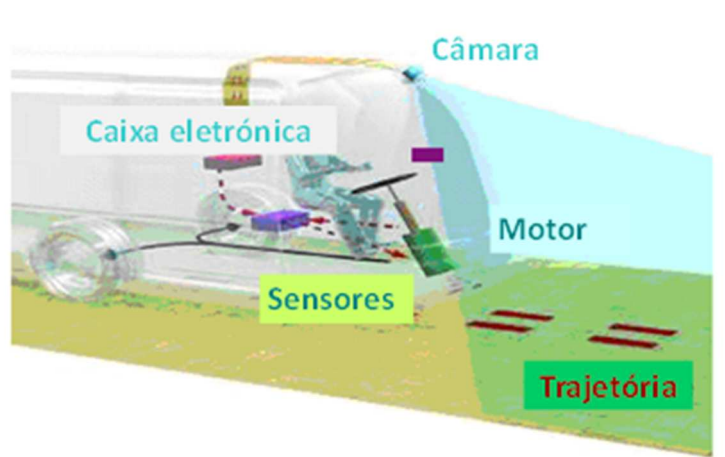


Figura 3. Esquema geral do sistema *Optiguide/Optiboard* (Adaptado de [13])

Num percurso são possíveis dois modos de condução:

- Modo assistido, no qual o guiamento (posição do veículo em relação à trajetória materializada) é controlado pelo sistema;
- Modo manual, no qual o guiamento é assegurado exclusivamente pelo condutor do autocarro, pelos meios tradicionais.

Em modo assistido o sistema apenas assegura o guiamento, pelo que o condutor tem sempre de seleccionar a velocidade de circulação (aceleração ou travagem) e manter a vigilância das condições da envolvente rodoviária e das situações de tráfego, designadamente visibilidade, estado do pavimento, desimpedimento da via, regulação de interseções, atravessamento de peões e interações com outros utentes. Trata-se de um sistema automação de nível 1, anotando-se que, neste caso, não há subsistemas para verificação do sucesso na transmissão do controlo completo para o condutor, em caso de saída do modo assistido.

A HMI do sistema é muito simples, compreendendo botões de acionamento pelo condutor (para ligar/desligar o sistema e ativá-lo/desativá-lo), avisos visuais (sistema ligado) e advertências sonoras (saída do modo assistido).

Na acostagem o sistema funciona até velocidades de circulação da ordem dos 30 km/h a 40 km/h, sendo a acostagem feita sem contacto entre os pneus e a plataforma de embarque, com distâncias máximas ao lancil da mesma de 3,5 cm. A velocidade máxima operacional já validada é de 50 km/h, correspondendo à velocidade máxima de teste de 70 km/h. Segundo o fabricante, presentemente o sistema está a ser adaptado para aplicação nos Jogos Olímpicos de Tóquio, onde se espera obter 70 km/h de velocidade máxima operacional.

A disponibilidade (taxa de funcionamento correto) do sistema (em Rouen) é de 9998,5/10000, conforme recolha de indicadores-chave de desempenho, realizada em cada acostagem dos veículos, através de uma unidade de registo de dados e sua transmissão para o controlador operacional. O sistema tem um nível de integridade de segurança SIL2.

No que se refere à largura de canal necessária para a operação dos autocarros, obtiveram-se os seguintes valores típicos para *gabarits* (zona livre de obstáculos em circulação normal) a 40 km/h e em curva em planta com 100 m de raio:

- *gabarit* nominal de 2,64 m;
- *gabarit* dinâmico de 3,15 m.

O *gabari* nominal corresponde ao espaço indispensável à inscrição física do veículo numa determinada trajetória; o *gabari* dinâmico inclui, adicionalmente, espaço para comportar a tolerância relativamente a inexactidões no guiamento lateral, eventuais desvios laterais provocados pelo vento ou acelerações transversais, o rolamento, e uma largura livre mínima até obstáculos fixos (ver Figura 4).

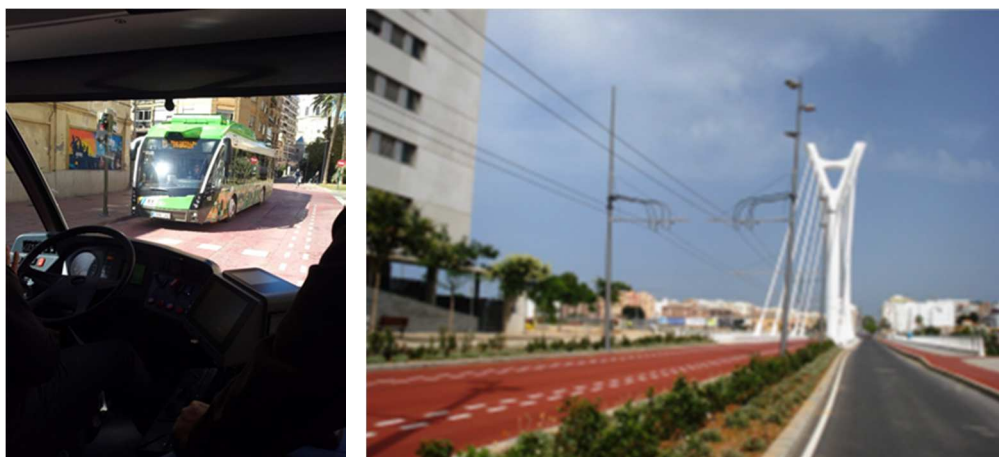


Figura 4. Exemplo materialização da linha de trajetória e dos limites do *gabari* livre de obstáculos em Castellón (Espanha)

É de salientar que, de acordo com a informação prestada pela Siemens, os *gabaris* a considerar num sistema de transporte rodoviário de passageiros são específicos desse sistema, devendo o cálculo dos *gabaris* ser contextualizado às características da infraestrutura e dos veículos a empregar. O sistema *Optiboard/Optiguide* foi concebido de modo a que o *gabari* de utilização seja idêntico ao de um veículo com guiamento manual. No Quadro 1 apresentam-se, como exemplo, os *gabaris* nominais e dinâmicos para o sistema *OptiBoard* instalado num autocarro de carroçaria rígida com 12 m de comprimento.

Quadro 1 – Exemplo de *gabaris* para sistema em autocarro IVECO Crealis Neo 12 [14]

| Elemento de traçado | Raio (m) | Velocidade (km/h) | Gabari (m) | |
|---------------------|----------|-------------------|------------|----------|
| | | | Nominal | Dinâmico |
| Alinhamento reto | - | 50 | 2,55 | 3,32 |
| | | 40 | 2,55 | 3,14 |
| | | 30 | 2,55 | 2,99 |
| | | 20 | 2,55 | 2,88 |
| Curva circular | 140 m | 50 | 2,82 | 3,78 |
| | 100 m | 40 | 2,93 | 3,73 |
| | 60 m | 32 | 3,18 | 3,97 |
| | 40 m | 26 | 3,47 | 4,30 |
| | 25 m | 20 | 4,00 | 4,96 |
| | 17 m | 17 | 4,68 | 5,68 |

Para ser eficiente, o sistema *Optiboard/Optiguide* deve funcionar em canal dedicado. Não obstante, o nível de desempenho operacional efetivo do sistema de guiamento descrito dependerá do nível de perfeição transmitido a um conjunto de aspetos adicionais, relacionados com a qualidade da construção e da manutenção dos seus equipamentos principais (a infraestrutura, a frota de veículos e o sistema eletrónico de assistência), bem como da competência dos condutores selecionados para conduzir os autocarros.

Relativamente à infraestrutura, são importantes os seguintes aspetos:

- a) a similitude entre os requisitos genéricos relativamente aos do guiamento manual, quanto a *gabari* dinâmico e à aplicação de critérios para instalação de guardas de segurança;
- b) o grande rigor exigido ao desempenho da superfície do pavimento e à sua estabilidade no tempo; o que obriga a critérios estritos de irregularidade longitudinal e transversal e ao cumprimento escrupuloso dos mesmos, à data da construção, no período da garantia da obra e durante todo o período de operação do sistema;
- c) o rigor de colocação das marcas de guiamento, obrigando à sua implantação por meios topográficos, e o elevado contraste, necessários nas fases de marcação (construção) e de operação (manutenção);
- d) a configuração especial dos cais de embarque e desembarque, designadamente quanto à tipologia dos lancis e zonas de transição, bem como os pequenos valores das tolerâncias de construção.

Relativamente à frota de veículos, são de salientar os seguintes aspetos:

- a) o sistema pode ser instalado em qualquer autocarro homologado para circular em estradas públicas (cumprindo os regulamentos europeus), sendo recomendável que essa integração seja considerada desde o início da conceção da configuração do autocarro conjuntamente pela Siemens e pelos fornecedores da plataforma automóvel e da carroçaria;
- b) o sistema corresponde a uma automação de nível 1 da tarefa de condução [8], sendo a fase assistida muito exigente relativamente ao rigor da configuração das marcas definidoras da trajetória e à ausência de vibrações que possam afetar a representação videográfica dessa configuração;
- c) a interface homem-máquina é muito simples, obrigando à reinicialização manual da fase assistida, após cada transição automática para fase manual;
- d) o sistema não dispõe de subsistemas de apoio à condução adicionais, podendo estes serem adicionados ao veículo, ainda que não de forma integrada com o *Optiboard/Optiguide*, uma vez que este foi concebido como sistema autónomo fechado (não admitindo entradas de qualquer outro tipo de sistema de apoio à condução);
- e) o sistema *Optiboard/Optiguide* é homologado pelo fabricante de forma individual e contextualizada às carreiras a realizar; assim, cada veículo é sujeito a um protocolo pré-definido (em função do percurso e das condições de operação) de testes, o qual é executado na infraestrutura.

Relativamente ao sistema eletrónico de assistência ao guiamento, é de destacar o seguinte:

- a) não há ainda experiência da sua instalação em veículos com atuação eletrónica do guiamento (drive by-wire);
- b) em manobra de acostagem o sistema funciona até velocidades de circulação de 30 km/h a 40 km/h, sendo a acostagem feita sem contacto entre os pneus e a plataforma de embarque e com uma distância máxima final entre os pneus e o lancil de 3,5 cm;
- f) a velocidade máxima operacional é de 50 km/h (velocidade máxima de teste de 70 km/h), prevendo-se que na aplicação do sistema em Tóquio (em 2020) se obtenha uma velocidade máxima operacional de 70 km/h.

Relativamente aos condutores dos autocarros, constatou-se ser importante assegurar que:

- a) tenham aproveitamento em ação de formação específica na condução de veículos com o sistema *Optiboard/Optiguide*;
- b) frequentem ações de atualização contínua regulares.

4 CUIDADOS ESPECIAIS NO CONTEXTO DO CASO DE ESTUDO

Tomando como base o conhecimento obtido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) no âmbito do estudo de um sistema de transporte público rodoviário em canal próprio e das peculiaridades do seu traçado e das características da sua envolvente (ver Figura 5), e considerando os requisitos do sistema de GAO analisado, acima descritos, foi possível definir um conjunto de recomendações genéricas para a infraestrutura e material circulante a satisfazer na aplicação de um sistema deste tipo no canal.



Figura 5. Vistas de envolvente rodoviária no Japão, semelhante ao espaço canal analisado [15]

4.1 Aspetos relacionados com a infraestrutura

Prevê-se que o canal seja reservado exclusivamente à circulação dos autocarros, com proteção física do corredor relativamente a outros utilizadores, incluindo outros operadores de transporte público. O número de cruzamentos de nível deverá ser escasso, e limitado a estradas secundárias ou caminhos pedonais, em zonas de velocidade condicionada.

É recomendável que o *gabarit* disponibilizado seja idêntico ao requerido por um sistema com guiamento manual, uma vez que os requisitos dos veículos com GAO são idênticos aos dos veículos com um guiamento manual. Excetuam-se os trechos em túnel, cujo *gabarit* é fixo e obriga à definição de restrições de velocidade máxima de circulação específicas.

Do mesmo modo, os veículos com GAO e condução manual apresentam requisitos idênticos relativamente a características da área adjacente à faixa de rodagem. Assim, no projeto da rodovia deverão ser adotadas as recomendações técnicas do InIR (atual IMT) sobre aspetos de segurança rodoviária da área adjacente à faixa de rodagem [16] e relativas a critérios de instalação e seleção de sistemas de retenção rodoviários [17]. No entanto, como neste caso o tráfego é exclusivamente de autocarros, os sistemas de retenção a instalar deverão ter nível de retenção suficiente para este tipo de veículos e para as velocidades e ângulos de embate previsíveis em cada local em análise. Igualmente, os sistemas de retenção deverão cumprir os critérios de largura útil e estar dotados com terminais e com transições adequadas.

É previsível que os fabricantes de sistemas de GAO venham a definir requisitos quanto às características superficiais dos pavimentos (designadamente de irregularidade longitudinal e transversal), em função do grau de suscetibilidade do funcionamento dos seus sistemas a essas características. Tal facto já se verifica, por exemplo, no transporte aéreo, com a definição, pelos fabricantes de aviões, de curvas de aceitabilidade das irregularidades da superfície dos pavimentos das pistas de aterragem e de *taxiway* em função da altura e do comprimento das irregularidades, podendo essas curvas ser definidas para cada tipo de aeronave.

No caso do sistema de GAO identificado, o fabricante não forneceu critérios do tipo assinalado, havendo apenas exigências estritas quanto ao rigor exigido na colocação das marcas de alinhamento (da ordem do milímetro) e ao desempenho da superfície do pavimento e à sua grande estabilidade no tempo, características que decorrem da necessidade de constância geométrica das marcas de alinhamento e da sua representação nos registos videográficos que o sensor óptico vai obtendo ao longo do percurso. Todos estes aspetos concorrem para a possibilidade de identificação correta dos elementos da geometria do traçado em planta (alinhamento reto, curva circular ou clotóide de concordância), condição imprescindível para que o sistema de guiamento automático funcione em modo assistido. Assim, são nocivas do funcionamento do GAO as deformações da superfície do pavimento que alterem a geometria das marcas (designadamente por fluência) bem como as que originem vibrações no veículo (inclinação ou rolamento) suscetíveis de alterar a nitidez das imagens captadas ou a projeção das marcas no sensor de captação de imagem. Geralmente, consideram-se bons valores do *International Roughness Index* (IRI) inferiores a 1,0 m/km (“confortável acima de 120 km/h”); já no que se refere aos cavados de rodéira, valores inferiores a 10 mm são considerados pequenos [18].

As exigências de limitação superior da irregularidade longitudinal e da transversal colocam-se num quadro operacional desfavorável em termos de impacte da passagem dos rodados dos autocarros, uma vez que, com GAO, a frequência de passagens dos rodados dos autocarros tem uma distribuição transversal muito fechada, atendendo à elevada repetibilidade das trajetórias seguidas eletronicamente. Em estudo realizado no LNEC verificou-se que tal acumulação de passagens sobre os mesmos alinhamentos produz um acréscimo de dano para diversas patologias, tendo-se obtido rácios, entre o dano sem dispersão transversal e o dano com dispersão transversal, oscilando entre 1.29 e 5.28, para rodados simples e rodados duplos de vários tipos de veículos pesados [19].

Atendendo às exigências quanto às características superficiais do pavimento e face ao desempenho observado em Castellón, para garantir que o GAO funcione ao longo da vida da obra considerou-se recomendável a construção de um pavimento de betão de cimento ou de outro tipo que assegure idêntica estabilidade geométrica ao longo da vida útil, sem necessidade de frequentes intervenções de manutenção ou conservação, para correção de deformações superficiais.

Para garantir a conveniente criação de expectativas *ad hoc* dos condutores acerca da resistência à derrapagem e para evitar zonas de transição, é recomendável que seja construído ao longo de todo o trecho um único tipo de pavimento. Com efeito, tais transições originam acréscimos na carga mental de condução, quando correspondendo a camadas de desgaste oticamente diferentes, e são suscetíveis ao desenvolvimento de ressalto se corresponderem a pavimentos estruturalmente diversos.

Para que o GAO funcione com eficácia, as marcas definidoras da trajetória pretendida devem ser executadas com moldes apropriados colocados sobre pontos de apoio implantados topograficamente com exatidão da ordem de 1 mm. As exigências de contraste das referidas marcas podem obrigar à instalação de bandas de contraste em pavimentos com superfície clara ou à remodelação da envolvente rodoviária, para remoção ou relocalização de elementos cuja sombra possa deteriorar o desempenho do subsistema de processamento do sinal de vídeo.

Os limites de velocidade máxima aplicáveis no canal rodoviário devem estar integrados na ótica do sistema de transporte rodoviário seguro: assim, nas intersecções onde possa haver conflito com peões ou utentes desprotegidos o limite deve ser de 30 km/h; nos locais onde possa ocorrer conflito transversal com outros veículos motorizados o limite deve ser de 50 km/h. Nas restantes zonas foi recomendado que o limite de velocidade seja determinado em função da combinação de características de traçado e de *gabarit*, conforme determinado pelo fornecedor do material circulante, bem como da área adjacente à faixa de rodagem.

4.2 Aspectos relacionados com o binómio veículo-condutor

As características específicas do traçado do trecho analisado são significativamente diferentes das do traçado dos exemplos de aplicação da tecnologia GAO conhecida. Tomando como exemplo o sistema visitado em Castellón, são notórias as diferenças: em extensão do percurso, com o trecho analisado aproximadamente quatro vezes maior do que o comprimento do trecho explorado em Castellón; e em traçado, que é essencialmente retilíneo, plano e inserido em envolvente com características urbanas no caso de Castellón, comparado com o traçado em envolvente com características rurais e suburbanas e significativamente sinuoso do mencionado trecho. Não obstante, os resultados de testes partilhados pelo fabricante do GAO contemplam a circulação a 40 km/h em curvas em planta com raio de 100 m e a 50 km/h em curvas com 140 m de raio; não há indicações contrárias à expectativa de o sistema poder ser certificado para velocidades de 60 km/h, atentos os raios de curvatura horizontal no traçado do trecho em estudo, que são maiores do que os empregues nos referidos testes.

Um sistema de automação de nível 1 da tarefa de condução [6] que assegure apenas guiamento transversal é suficiente para responder às exigências de apoio automático à tarefa de condução, necessário para evitar erros de desatenção e suas consequências. Face ao estado atual de desenvolvimento dos HMI de sistemas embarcados e do conhecimento acerca do desempenho humano em tarefas de supervisão de automatismos, considera-se desaconselhável a utilização de sistemas de automação de nível 3 e merecedor de cuidada avaliação adicional a circulação de veículos com sistemas de automação de nível 2.

Considera-se fundamental que os autocarros estejam equipados com sistema de ISA – *Intelligent Speed Assistance* (não ultrapassável), que é um sistema de apoio à condução que permite limitar, em cada instante do trajeto, a velocidade de circulação ao limite máximo pré-definido para o local onde o veículo se encontra e para as condições atmosféricas prevalentes no momento em que lá passa.

Face ao observado em Castellón, é recomendável que sejam escolhidos para a frota do sistema de transporte veículos equipados de raiz com o sistema de GAO.

4.3 Certificação do sistema e da sua operação

Os veículos equipados com a tecnologia de GAO devem ser certificados de forma individual e contextualizada às carreiras a realizar. O respetivo protocolo de ensaios a realizar para o efeito e todo o processo de certificação devem ser acompanhados pelo operador do sistema de transporte e supervisionados pela entidade reguladora do sector. Os ensaios devem cobrir a totalidade do trecho e incidir sobre as manobras de acostagem às diversas paragens, a circulação em secção corrente e nas intersecções, bem como abranger as manobras de entrada e saída de túneis, de pontes e de pontões. A questão da certificação do sistema afigura-se de particular relevância na elaboração dos cadernos de encargos para fornecimento de sistemas deste tipo, sendo expectável haver candidatos com sistemas alternativos.

O operador do serviço de transporte deve instalar um sistema de gestão da segurança rodoviária do funcionamento das carreiras cumprindo a norma ISO 39001:2018, devidamente validado pela entidade reguladora do sector.

5 REFERÊNCIAS

- 1– Fagnant, D. J. ; Kockelman, K., 2015 – Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. Research Part A: Policy and Practice, 77, 167-181.
- 2 – Willemsen, D.; Stuijver, A.; Hogema, J., 2015 – Automated Driving Functions Giving Control Back to the Driver: A Simulator Study on Driver State Dependent Strategies. 24th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles (ESV2015). Gothenburg, Sweden: June 8-11, 2015
- 3 – Lutin, J.M., 2013 – Opportunities to Leverage Advances in Driverless Car Technology to Evolve Conventional Bus Transit Systems. Podcar City 7 Symposium; Emerging Transportation Technologies – R&D, George Mason University, USA.
- 4 – Sabey, B.E.; Staughton, G.C., 1975 – Interacting roles of road environment, vehicle and road user in accidents. 5th International Conference of the International Association for Accident and Traffic medicine, and the 3rd International Conference on Drug Abuse of the International Council and Alcohol and Addiction, London, 1-5 September, 1975
- 5 – FERSI, 2018 – Safety through automation? Ensuring that automated and connected driving contribute to a safer transportation system. Forum of European Road Safety Research Institutes, Brussels.
- 6 – SAE, 2016 – Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. J3016_201609. Society of Automotive Engineers.

- 7 – Cardoso, J.L., 1996 – Estudo das relações entre as características da estrada, a velocidade e os acidentes rodoviários. Aplicação a estradas de duas vias e dois sentidos. Dissertação apresentada no Instituto Superior Técnico para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.
- 8 – Shergold, I.; Wilson, M.; Parkhurst, G., 2016 – The mobility of older people, and the future role of connected autonomous vehicles. A Literature Review. Project Report. Centre for Transport and Society, University of the West of England, Bristol, Bristol.
- 9 – Blanco, M.; Atwood, J.; Vasquez, H.M.; Trimble, T.E.; Fitchett, V.L.; Rsdbeck, J.; Fitch, G.M.; Russell, S.M.; Green, C.A.; Cullinane, B.; Morgan, J.F., 2015 – Human Factors Evaluation of Level 2 and Level 3 Automated Driving Concepts. Center for Automated Vehicle Systems, Virginia Tech Transportation Institute, Virginia, USA.
- 10 – Banks, V.A.; Erikssona, A.; O'donoghuec, J., Stanton, N.A., 2018 – Is partially automated driving a bad idea? Observations from an on-road study. *Applied Ergonomics* 68 (2018) 138–145.
- 11 – Banks, V.A.; Stanton, N.A., 2017 – Analysis of driver roles: modelling the changing role of the driver in automated driving systems using EAST. *Theor. Issues Ergon. Sci.*
- 12 – Brookhuis, K.A.; De Waard, D., 2018 – Consequences of automation for driver behaviour and acceptance. University of Groningen, Department of Psychology Groningen, Netherlands.
- 13 – Marchand, D., 2017 – Presentation du systeme d'assistance par guidage optique. PCI/OGUIDE/51.0005.11/FB/FB, Siemens.
- 14 – Marchand, D., 2018 – Apresentação Optiboard: para condução de ônibus, tróleibus. Departamento Optiguide (Châtillon)-França
- 15 - Nagai, T., 2015 – Temporary restoration project of BRT instead of restoring railways on Tsunami-hit regions by the Great East Japan Earthquake. Comunicação pessoal.
- 16 – Roque, C. A.; Cardoso, J. L., 2011 – Área adjacente à faixa de rodagem. Manual sobre aspetos de segurança. In IR, Lisboa.
- 17 – Roque, C. A.; Cardoso, J. L., 2010 – Sistemas de retenção rodoviários de veículos – Manual de aplicação. Disposições normativas. In IR, Lisboa.
- 18 – Schmidt, B., Wambold, J., Kawamura, A., Descornet, G. 2000 – Piarc World Road Association. International Experiment to Harmonise Longitudinal and Transverse Profile Measurement and Reporting Procedures, Road Directorate, Danish Road Institute.
- 19 – Domingos, P., 2016 – Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis através de métodos incrementais. Dissertação de doutoramento, LNEC, IST.