

Impacto da tecnologia embarcada em Carros Elétricos, Infraestrutura de *Smart Highways* e Sistemas Inteligentes de Transportes sobre o Projeto Geométrico

AUTORES¹

Luis Enrique Coral Villanueva

José Mauro Márquez, PhD.

RESUMO

Observações preliminares apontam que o impacto da tecnologia embarcada em carro elétrico, infraestrutura de *smart highways* e sistemas inteligentes de transportes sobre o projeto geométrico será de tal ordem que poderá inverter a influência atual que o carro tem, enquanto veículo de projeto, sobre o traçado das estradas, a ponto de permitir especular que no futuro será a estrada quem comandará o automóvel; tamanho o efeito esperado sobre conceitos consolidados nos elementos de projeto e parâmetros geométricos. Não bastasse a inversão de posições, enxerga-se ainda que o dinamismo promovido pelos avanços da tecnologia poderá forçar que a engenharia rodoviária tenha de incorporar flexibilidade, escalabilidade e capacidade adaptativa à concepção de projetos geométricos como forma de se inserir no contexto. O artigo decorre de pesquisa exploratória e analisa a tecnologia embarcada nessas macro variáveis, para a partir de premissas apoiadas no que trazem de inovação, amparadas que estarão na lógica que lhes dá sustentação, estimar os efeitos esperados do que poderá ser mudado daqui por diante.

Palavras chave: Estradas Inteligentes e Rodovias Inteligentes – Sistemas Inteligentes de Transportes – Carro Elétrico Conectado e Autônomo – Projeto Geométrico – Conectividade Veicular e Segurança Viária.

ABSTRACT

Preliminary observations point out that the impact of on-board electric car technology, smart highway infrastructure and intelligent transport systems on the geometric design will be such that it may reverse the current influence that the car has as a design vehicle on the layout of roads, to the point of speculating that in future it will be the road that will drive the car; size the expected effect on consolidated concepts in design elements and geometric parameters. Reversing positions is not enough, but it is clear that the dynamism promoted by advances in technology may force road engineering to incorporate flexibility, scalability and adaptive capacity into the design of geometric designs as a way to fit into the context. The article is based on exploratory research and analyzes the technology embedded in these macro variables, based on assumptions based on innovation, supported by the logic that supports them, to estimate the expected effects of what could be changed from now on.

Keywords: Smart Highways and Smart Roads- Intelligent Transportation System - Electric Vehicle and Self-Driving Car - Geometric Design - Connectivity Car and Road Safety.

1 INTRODUÇÃO

Evidências empíricas mostram que ruas e estradas foram alteradas ao longo da história, devido – principalmente – à necessidade que havia de adequá-las às especificidades dos veículos que por ela circulavam (NETO *et al.*, 2016). Esse é o caso, por exemplo, de mudanças ocorridas quanto à largura e traçado de vias e vielas no século XIX em função das carroças de tração animal (com rodas de aço e madeira), vulgarmente chamadas de *charretes*, em que a pavimentação das estradas era de terra batida ou de paralelepípedos para facilitar o impulso das bestas e que, devido ao cumulativo desgaste de seu vigor, eram evitados aclives ou declives para poupá-los dos esforços desnecessários. Todavia, à época não existiam maiores preocupações com os “pontos cegos” decorrentes de curvas ou rampas que podiam ser curtas e fechadas², justamente pelo cabresto que o condutor

¹ Respectivamente, Engenheiro Civil pela Universidade Veiga de Almeida – UVA e PhD em Engenharia de Transportes pela University of the West of England.

² NETO *et al.* (2016) relata que “no início do século 20, os veículos de tração animal raramente excediam os 13 Km/h, de forma que a velocidade e as distâncias de visibilidade não eram consideradas como fatores de projeto importantes, as curvas eram projetadas como concordâncias bruscas entre longas tangentes,

podia impor aos cavalos a título de freio, permitindo-se cadenciar ainda mais trote e galope dos mesmos. Já, com a popularização do carro a combustão interna em meados do século XX, privilegiara-se o uso do asfalto e do concreto como pavimento na construção de ruas e rodovias numa clara atenção à demanda do novo veículo. Dessa vez, mais veloz e também mais pesado, levando, subsequentemente, ao aumento da largura da pista e o redimensionamento das curvas que passaram a ser mais abertas justamente para evitar derrapagens e colisões dos “bólidos”³ que chegavam.

Ainda, em linha com as especificidades desse novo veículo, o surgimento do pneu radial em meados desse século (criada em 1946 pelos irmãos Michelin) representou importante evolução em relação ao pneu convencional (também chamado de *diagonal*) e também influenciou a concepção de projetos geométricos. Por outras palavras, verificara-se naquele momento que não apenas o novo veículo em circulação tendia a mudar o projeto geométrico, mas também as particularidades que redimensionavam o próprio carro, dando-lhe novas capacidades (peças e partes), é que incidiam na adequação do traçado⁴.

Desta vez, em função da crescente implantação de *carros elétricos* (autônomos e conectados) em substituição ao de combustão interna, mas principalmente devido à incorporação de tecnologia embarcada neles através de dispositivos eletrônicos e *softwares* (tecnologia LIDAR - *Light Detection And Ranging* e sistema *Cruise Control*, por exemplo), é que especula-se, advirão relevantes mudanças ao traçado de projetos geométricos em rodovias novas a serem construídas e nas que já estão em uso e precisarão ser remodeladas. Todavia, se a essa perspectiva for adicionado que a infraestrutura das *smart highways* traz consigo inovações tecnológicas tais, que não apenas os materiais alternativos ao asfalto e concreto, mas também incorpora novos conceitos e funcionalidades como “fonte” de carregamento da bateria do carro em movimento ou como “meio” de sinalização do trânsito e iluminação de estradas (trazendo maior autonomia ao veículo e mais conforto e segurança aos usuários); se verá que ajustes em torno do projeto geométrico ganha complexidade e redobrados contornos. E por fim, se constata que a aplicação de *sistemas inteligentes de transportes* com crescentes serviços inovadores relacionados ao transporte e gerenciamento de tráfego, permitirá que condutores e passageiros de veículos sejam usuários mais bem informados e com maior acesso à tecnologia; NETO *et al.* (2016) ponderam que igualmente promoverá o repensar dos projetos geométricos. Portanto, percebe-se que a tecnologia embarcada nessas três macro variáveis (*carros elétricos*, *smart highways* e *sistemas inteligentes de transportes*) vêm ao uníssono numa sinfonia orquestrada que desencadeia efeito *water drop*⁵ no desenvolvimento da eletro mobilidade e concomitantemente impacta frontalmente as concepções mais consolidadas da *engenharia rodoviária* como talvez nunca antes tenha

enquanto aclives longos e íngremes eram evitados. As principais considerações de projeto eram o cumprimento e as características de mobilidade dos veículos, sobretudo nas curvas”.

³ NETO *et al.* (2016) aponta que “com a invenção dos automóveis, surgiram os primeiros textos técnicos a tratar dos princípios fundamentais do projeto geométrico de vias de transporte, datados de 1912. Desde então, órgãos regulamentadores foram criados, manuais foram publicados, congressos foram realizados e diversos novos conceitos foram introduzidos ao redor do mundo. [...] com o objetivo de se estabelecer as diretrizes principais de projeto geométrico de vias e, em especial, garantir a segurança dos usuários e a eficiência operacional de tráfego”.

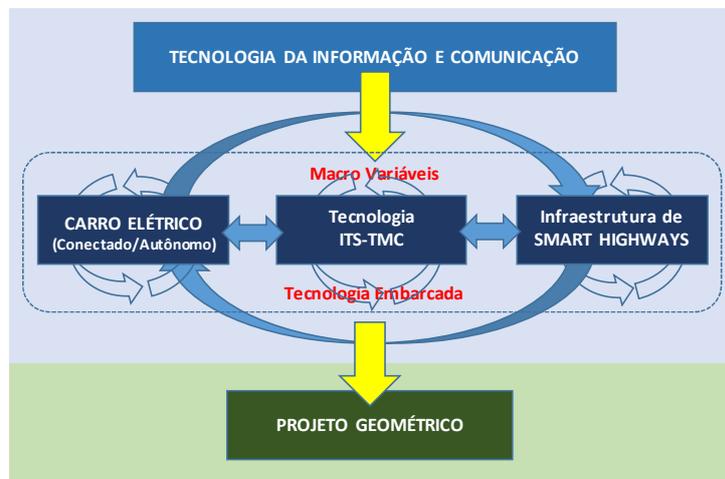
⁴ Ao mesmo tempo, rodovias caem em desuso ou são desativadas devido à sua inadequação a esse contexto, uma vez que não mais atendem às novas especificidades dos veículos e demandas de seus usuários. Esse é o caso emblemático da Route 66 nos EUA que foi substituída pelas grandes autoestradas interestaduais.

⁵ O momento em que uma gota cai sobre a água e causa ondulações na superfície é chamado pelos fotógrafos de “*water drop*” ou, traduzindo para o português, gota d’água.

sido vista, trazendo benefícios claros, tais como: a redução de acidentes de trânsito (segurança dos usuários) e o equacionamento dos congestionamentos (eficiência operacional do tráfego), que justificam de antemão os redobrados esforços que a engenharia civil despenderá em sua busca por conciliar técnica e tecnologia em prol de sociedade e meio ambiente.

Os conceitos *smart highways* e *rodovias inteligentes*, entretanto, presentes neste artigo não se confundem como sendo a mesma coisa. Muito embora a tradução do inglês para o português e vice-versa assim o sugira. A bibliográfica reporta que ao se falar de *smart highways* ou *estradas do futuro* como também são conhecidas, esteja se referindo à infraestrutura tecnológica que estão sendo instaladas nas estradas (novos materiais utilizados no pavimento, novos conceitos e funcionalidades que incluem a recarga da bateria do carro elétrico em movimento e iluminação e sinalização); enquanto que o termo *rodovias inteligentes* está mais associado à questão que decorre do uso da tecnologia aplicada, tanto nos sistemas inteligentes de transportes ou ITS (de, *Intelligent Transportation System*), quanto nos centros de gerenciamento de transportes ou TMC (*Transportation Management Center*), potencializada pelo Protocolo DSRC (*Dedicated Short Range Communication*). A Figura 1 busca representar a interatividade que se dá entre as macro-variáveis que se interagem holisticamente na concepção de uma rodovia e que esta, por sua vez, pode acabar impactando nas que inicialmente a condicionaram, num claro efeito de retroalimentação exponencial, nos moldes do pensamento sistêmico descrito por GOMES *et al.* (2014) e Vasconcellos, 2010.

Figura 1 – Interdependência das Macro Variáveis no Projeto de Engenharia de Estradas.



Fonte: Elaboração própria, com base na revisão bibliográfica.

Fica claro assim que cada macro variável possui seu próprio processo de retroalimentação que a faz evoluir numa espiral positiva. De maneira concomitante, essa evolução individual pressiona a evolução das outras macro variáveis. Assim, todas elas em conjunto tendem a pressionar as mudanças no seio do projeto geométrico como forma deste se inserir num contexto cada vez mais tecnológico.

Óbvio se tem que os avanços da tecnologia da informação e de comunicação (TI e TIC), permeando o processo como um todo. É a hipótese que se buscará explorar neste artigo a partir da pergunta de pesquisa:

Qual o impacto da tecnologia embarcada nas macro variáveis sobre o projeto geométrico?

Apoiado no pensamento sistêmico (GOMES *et al.*, 2014 e Vasconcellos, 2010) e na retroalimentação das macro variáveis, aventa-se aqui a hipótese que o projeto de engenharia de estradas, daqui por diante, terá de ser concebido a partir de olhar sistêmico que enxergue a simbiose que se dá entre as partes e o carácter holístico que há entronizado no processo. Por outras palavras, não haverá como conceber um sem o outro e vice-versa, além da necessidade de sabê-lo como algo maior ou até mesmo superior à simples junção das partes; em linha com o que o filósofo grego Aristóteles já o predissera ao afirmar que “*o todo é maior do que a simples soma das partes*”.

O artigo decorre de pesquisa exploratória nas bases descritas por Gil (2002), pois se busca ganhar conhecimentos sobre o tema em pauta. Já no que tange aos procedimentos técnicos utilizados recorre-se, tanto à pesquisa bibliográfica, quanto à pesquisa documental e, neste caso, apoia-se no filtro realizado por Villanueva e Silva (2020) quando organizam buscas realizadas através da internet partindo de palavras-chave tais como: *carro elétrico (conectados e autônomos), recarga da bateria de veículos em movimento, smart highways e rodovias inteligentes, sistemas inteligentes de transportes e centros de gerenciamento de transportes, conectividade veicular e seguridade viária* e tem como objetivo entender o que muda no projeto de engenharia de estradas a partir das condicionantes estabelecidas pelas macro variáveis, e está organizado da seguinte forma: a primeira seção, que inclui esta introdução, avança em termos empíricos e hipotéticos sobre o que e como deverão ocorrer as mudanças no projeto geométrico. A segunda seção destina-se à revisão da literatura objetivando analisar, *i)* os elementos de projeto e parâmetros geométricos no contexto da engenharia de projetos de estradas; *ii)* os sistemas inteligentes de transportes (ITS), incluindo o Protocolo DSRC – *Dedicated Short Range Communication* e os centros de gerenciamento de transportes (TMC); realizar; *iii)* um levantamento atualizado sobre o que há de avanços em torno da infraestrutura nas *smart highways* e, por fim, dimensionar; *iv)* as especificidades do carro elétrico (conectado e autônomo) enquanto “*computador que se move*” no dizer de Benke, Perez e Armendaris (2017). Na terceira seção procede-se ao desenvolvimento da pesquisa propriamente dito, e se parte de premissas estabelecidas para as três macro variáveis (carros elétricos, *smart highways* e sistemas de inteligência de transportes), apoiadas na sustentação lógica que as ampara, evoluindo-se para estimar o que deverá mudar - de fato - no projeto geométrico, em termos de efeito esperado. Por fim, na quarta seção, são descritas as conclusões.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A seção discorre sobre quatro conceitos básicos que, de maneira crescente e concomitante, estão cada vez mais presentes na engenharia de projetos de estradas. São as três macro variáveis que incidem diretamente sobre o projeto geométrico propriamente dito, notadamente, no que tange aos elementos de projeto e os parâmetros geométricos. Dentre elas, a análise de: *i)* o carro elétrico (conectados e autônomos) e sua bateria; *ii)* a infraestrutura de *smart highways* enquanto “fonte” de recarga da bateria do carro em movimento e, por fim; *iii)* os ITS sob conceito de *rodovias inteligentes*; além, é claro, dos elementos de projeto e parâmetros geométricos, com os quais inicia-se esta revisão.

2.1 Elementos de Projeto e Parâmetros Geométrico

É relevante destacar que dentre as três fases da construção de estradas: Planejamento, Projeto e Construção, a literatura técnica passou a incluir a Sinalização e Manutenção como parte do processo enquanto crescentemente associada à questão da segurança dos usuários e à eficiência operacional do tráfego; revelando a esta “fase” como primeiro elo de ligação aos ITS-TMC e Rodovias Inteligentes e às *Smart Highways* ou Rodovias do Futuro. Assim, nesta seção se terá como referencial bibliográfico, o “Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas” publicado pelo DNIT em 2009; o “Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais” publicado pelo DNER em 1999 e o livro “*A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*” da AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials (2011), mais conhecido como “*Green Book*”. Todavia, de maneira pontual se recorre a Macedo (2008); PEREIRA *et al.*, 2010; também como a NETO *et al.*, 2016.

Por esse referencial se tem que as informações coletadas no Planejamento⁶ são usadas para fazer o Projeto⁷, que consiste basicamente nos desenhos da planta da estrada, de seu perfil transversal e longitudinal e de suas obras de arte; do dimensionamento das obras e da elaboração do orçamento. A planta de uma rodovia consiste uma série de segmentos retos concordados por curvas. Assim, rodovia deve adaptar-se ao terreno, contornando os obstáculos naturais ou transpondo-os por meio de obras de arte. Os raios das curvas devem ser os maiores possíveis, estipulando-se valores mínimos que variem em função dos acidentes do terreno e do tráfego previsto. Quaisquer que sejam esses valores, a engenharia de construção de rodovias preocupa-se com problemas de segurança e visibilidade. Por sua vez, o perfil longitudinal da rodovia é uma sucessão de rampas, planos e declives condicionados pela topografia do terreno, cujas ondulações são atenuadas por uma sucessão de cortes e aterros. As rampas e declives raramente excedem a inclinação de cinco por cento e os diversos segmentos são ligados por curvas circulares ou parabólicas. O perfil transversal é formado por uma pista pavimentada⁸, protegida por acostamentos laterais e depende do tráfego previsto e da ondulação natural do terreno.

⁶ Aqui define-se a principal função da estrada (comercial, turística, militar, etc.) e por ela determina-se seu traçado, a resistência e os materiais a serem utilizados na construção. Nesta fase também são calculados o volume, a velocidade e a densidade do tráfego, os tipos e pesos dos veículos que farão o trânsito na estrada, as horas de maior volume do tráfego, as possibilidades de acidentes e congestionamentos e os custos de construção, operação e manutenção. A densidade demográfica das regiões a serem servidas e o tipo de atividade econômica também são levados em consideração. Consultam-se estudos do crescimento da frota de veículos do país e suas repercussões sobre a capacidade futura de escoamento da rodovia e sua possível ampliação.

⁷ As principais etapas podem ser resumidas: a) projeto geométrico de uma estrada; sendo este o processo de correlacionar os elementos físicos às características de operação, frenagem, aceleração, condições de segurança, conforto, etc.; b) critérios para o projeto geométrico, apoiado em princípios de geometria, de física e as características de operação dos veículos; c) cálculos teóricos e resultados empíricos deduzidos de numerosas observações e análise do comportamento dos motoristas, reações humanas, capacidades das estradas existentes, entre outras e d) possibilidade técnica, econômica e social viáveis.

⁸ O pavimento é a superfície lisa e impermeável sobre a qual os veículos circulam, constituída de material de resistência e durabilidade adequadas ao tráfego estimado e às condições meteorológicas. Compõe-se de duas partes: a primeira, que é a camada de fundação, serve de alicerce e a segunda, denominada camada de desgaste, é disposta por cima da primeira e constitui a superfície. A camada de fundação destina-se a oferecer resistência às cargas verticais e transmiti-las ao terreno, distribuindo-se por uma área cuja extensão varia de acordo com a consistência do solo. A camada de desgaste deve ter as seguintes características: resistência às cargas verticais e ao desgaste, superfície plana e aspereza para evitar as derrapagens.

Depois da abertura da estrada e preparação do pavimento de acordo com as especificações do projeto, é feita a demarcação e sinalização da rodovia, de modo a orientar os motoristas quanto aos limites de velocidade adequados a cada trecho, às entradas e saídas e às distâncias de cada localidade servida pela rodovia. A obra é terminada com a arborização e outros acabamentos de caráter paisagístico. Por fim, a manutenção da estrada, deve ser permanente e interferir o mínimo possível com o fluxo de tráfego. Dependendo do tipo de pavimento, será preciso remendar buracos na superfície asfáltica, cimentar rachaduras no concreto, nivelar estradas de terra com o uso de tratores, ré-nivelar placas de concreto mediante a injeção de material, consertar proteções, reparar valetas, aterros e cortes, pintar a sinalização e remover a vegetação excessiva.

A seguir descreve-se, de maneira pontual, elementos de projeto e parâmetros geométricos, com propósito de antever sua interatividade com as outras macro variáveis que a acabam influenciando-os.

2.1.1 Velocidade de Projeto ou Velocidade Diretriz

Para o DNER (1999), a velocidade diretriz é a velocidade selecionada para fins de projeto da via e que condiciona as principais características da mesma, tais como: curvatura, superelevação e distância de visibilidade, das quais depende a operação segura e confortável dos veículos. Representa a maior velocidade com que pode ser percorrido um trecho viário cuja superfície de rolamento apresenta características normais de rugosidade e ondulações, com segurança e em condições aceitáveis de conforto, mesmo com o pavimento molhado, quando o veículo estiver submetido apenas às limitações impostas pelas características geométricas, sem influência do tráfego. Para atender aos objetivos abrangidos pela conceituação acima, a velocidade diretriz não deve ser inferior às velocidades de operação⁹ que efetivamente deverão predominar, representativas da maioria do tráfego futuro, conforme seja possível estimar previamente a partir das características técnicas preliminarmente adotadas e de relevo.

A esse respeito houve uma importante atualização nesse conceito de forma que a versão mais atualizada do *Green Book* da AASHTO (2011) privilegia a observação da consistência do traçado rodoviário ao invés da simples imposição dos parâmetros baseados na velocidade de projeto. Essa adequação é fruto de uma demanda de entidades de diversos países para que a velocidade operacional, definida pela entidade como “aquela na qual se observam os condutores operando seus veículos sob condições de fluxo livre”, passasse a ser considerada de alguma forma no projeto geométrico, conforme se nota na listagem dos fatores que a influenciam:

- . Condições físicas da via: geometria da seção transversal, alinhamentos horizontais, alinhamento vertical e tipos e condições dos dispositivos de sinalização, do pavimento e dos dispositivos de drenagem;
- . Condições climáticas: ocorrência de chuvas, neblina, névoa, calor intenso e condições adversas de luminosidade no período diurno ou noturno;
- . Condições do motorista: idade, estado físico e emocional, extensão da viagem, presença de acompanhantes, familiaridade com a via, nível de obediência às leis de trânsito, etc.;

⁹ Para Macedo, 2008 “circunstâncias pontuais podem exigir uma velocidade inferior à velocidade de projeto, denominada velocidade de operação ou velocidade operacional. Assim, [...] é definida como a máxima velocidade permitida aos veículos, sem que atinjam a velocidade de projeto, estabelecida por condições locais. Esta velocidade é utilizada nos estudos de capacidade e níveis de serviço da via”.

- . Características e estado do veículo: tipo básico de veículo (de passageiro ou comercial), dimensões básicas, peso, distribuição de carga, idade, condições de manutenção e condições de desempenho;
- . Condições operacionais da via: volume de composição de tráfego, limite legal de velocidade e presença de fiscalização por radar ou policiamento.

A velocidade efetivamente praticada resulta, portanto, da conjugação de todos os fatores mencionados e da percepção que o condutor tem acerca destes. Diz-se então que a velocidade operacional é uma variável comportamental.

2.1.2 Veículo de Projeto

Macedo (2008) define como tal, o veículo teórico de uma certa categoria¹⁰, cujas características físicas e operacionais representam uma envoltória das características da maioria dos veículos existentes nessa categoria. Essas características condicionam diversos aspectos do dimensionamento geométrico de uma via, tais como: *a*) a largura do veículo de projeto influencia na largura da pista de rolamento, dos acostamentos e dos ramos de interseções; *b*) a distância entre eixos influi no cálculo da Superlargura e na determinação dos Raios Mínimos internos e externos das pistas dos ramos das interseções; *c*) o comprimento total do veículo influencia a largura dos canteiros, a extensão das faixas de espera, etc.; *d*) a relação peso bruto total / potência influencia o valor da rampa máxima e participa na determinação da necessidade de faixa adicional de subida; *e*) a altura admissível para os veículos influi no gabarito vertical. A escolha do veículo de projeto¹¹ deve levar em consideração a composição do tráfego que utiliza ou utilizará a rodovia, obtida de contagens de tráfego ou de projeções que considerem o futuro desenvolvimento da região.

2.1.3 Distâncias de Visibilidade

A condição de visibilidade proporcionada ao motorista é um dos fatores mais importantes para a segurança e eficiência operacional de um veículo trafegando sobre uma via rural ou urbana. A garantia de distâncias de visibilidade adequadas permite ao motorista captar e interpretar informações sobre a via e o tráfego, adequar velocidade e trajetória do veículo, tomando decisões a tempo e com segurança. Nesse sentido, foram estabelecidos 3 tipos básicos de distâncias de visibilidade que são levados em consideração, indiretamente, na definição do traçado da rodovia, especialmente em relação aos alinhamentos horizontais e verticais da rodovia. São eles: *i*) distância de visibilidade de parada (DVP); *ii*) distância de visibilidade de tomada de decisão (DVTD) e *iii*) distância de visibilidade de ultrapassagem (DVU). Essas distâncias, que estão diretamente relacionadas às características geométricas da rodovia, devem ser garantidas ao longo de todo o traçado, sendo condizentes com as condições críticas dos veículos (em relação ao

¹⁰ Nesse aspecto o DNER (1999) descreve a tendência que há para a diminuição de dimensões dos veículos, notadamente a partir de 1965 em diante. Nesse aspecto, aponta que é de extrema importância a posição ocupada pelo motorista dentro do veículo, pois não só afeta a sua comodidade como é determinante na distância de visibilidade, pois a altura dos olhos do condutor médio. Já, quanto ao raio mínimo de giro, ele é condicionado pela largura, distância entre eixos e comprimento total do veículo.

¹¹ NETO *et al.* (2016), complementam que “Na análise da frota há veículos que apresentam características mais críticas que as do veículo de projeto, mas isso não significa que tais veículos ficarão impossibilitados de trafegar em determinados trechos ou que a disposição da via oferece risco à segurança dos motoristas e sim que estes estarão sujeitos a condições operacionais mais desfavoráveis que as mínimas estabelecidas. Estas condições dizem respeito à dirigibilidade e ao nível de conforto apenas.”

freio, suspensão, pneus, etc.) e da superfície de rolamento (rugosidade, umidade, etc.) e atendendo aos requisitos de comportamento de parcela significativa dos motoristas.

2.1.3.1 Distância de Visibilidade de Parada (DVP)

Corresponde à mínima distância necessária entre veículos para que um motorista, trafegando com velocidade diretriz, seja capaz de identificar uma situação de perigo (como uma obstrução na via), processá-la e desacelerar o seu veículo até chegar na sua completa parada. Deve-se levar em conta que cada uma dessas etapas, de percepção, reação e frenagem, possui um período de tempo associado, no qual o veículo percorre uma determinada distância em função da velocidade praticada. Assim, o cálculo da DVP corresponde à soma da distância percorrida durante o período de percepção e reação (D_1) e distância percorrida durante o processo de frenagem, desde o acionamento do freio até a imobilização efetiva do veículo (D_2) (NETO *et al.*, 2016).

2.1.3.2 Distância de Visibilidade de Tomada de Decisão (DVTD)

A adoção da DVP costuma ser suficiente para que um motorista razoavelmente competente e atento execute uma parada de emergência quando necessário. Porém, há situações em que a compreensão é confusa e talvez seja necessária a execução de manobras bruscas e pouco comuns. A limitação da distância de visibilidade ao mínimo necessário para simplesmente parar pode impedir que o motorista realize manobras evasivas, frequentemente menos perigosas que a interrupção absoluta do veículo. Nessas circunstâncias a DVTD fornece o cumprimento adequado às necessidades do motorista (NETO *et al.*, 2016). Nessa linha, o DNER (1999) define a DVTD como “a distância necessária para que um motorista tome consciência de uma situação potencialmente perigosa (...) avalie o problema encontrado, selecione o caminho a seguir e a velocidade a empregar e execute a manobra necessária com eficiência e segurança”. Assim ao identificar uma situação de risco como um veículo quebrado na pista de rolamento, por exemplo, o motorista tomará uma das seguintes providências: desacelerar até chegar à completa parada ou alterar velocidade e trajetória do carro para desviar do obstáculo. Cada caso deve apresentar um DVTD diferente, pois utiliza-se tempos de reação distintos.

2.1.3.3 Distância de Visibilidade de Ultrapassagem (DVU)

NETO *et al.*, 2016 descreve que a DVU corresponde à extensão necessária em uma rodovia bidirecional com duas faixas de tráfego para que um veículo possa ultrapassar outro com menor velocidade, em condições adequadas de conforto e segurança. A realização das manobras de ultrapassagem está altamente relacionada à eficiência operacional da via, pois nessas circunstâncias o nível de serviço e a capacidade são influenciados pela qualidade de vezes que um veículo lento é alcançado por um veículo de maior velocidade e o tempo que leva para esse veículo realizar manobra de ultrapassagem. No caso de rodovias com baixo volume de tráfego a necessidade de ultrapassagem é naturalmente reduzida e o ato da ultrapassagem é facilitado pelo baixo número de veículos que se aproximam pelo outro lado. Em rodovias mais movimentadas, entretanto, onde cresce o número de veículos tentando ultrapassar, bem como o número de veículos vindo no sentido contrário, torna-se conveniente o aumento na quantidade de oportunidades ao longo do traçado, de forma a evitar que motoristas mais apressados

busquem realizar ultrapassagem perigosas, sem condições de visibilidade adequadas, aumentem significativamente a chance de ocorrência de acidentes.

2.1.3.4 Verificação das Condições de Visibilidade ao Longo da Rodovia

As condições de visibilidade ao longo do traçado devem ser verificadas em projeto, por meio da análise do traçado em planta e do perfil longitudinal da rodovia, levando em conta a necessidade de continuidade de visibilidade. Os principais elementos das rodovias que podem criar restrições de visibilidade aos motoristas são as curvas verticais convexas, nas quais não é possível enxergar a movimentação após uma determinada distância, as curvas verticais côncavas, nas quais a condição de visibilidade é dificultada no período noturno, quando o farol do veículo consegue iluminar apenas uma extensão reduzida da rodovia à frente, e as curvas horizontais, devido a obstruções laterais posicionadas nas proximidades da rodovia (NETO *et al.*, 2016).

2.1.4 Alinhamento Horizontal

O traçado da rodovia, a ser desenvolvido em projeto, deve ser considerado como uma entidade tridimensional, de fluentes e gradativas mudanças de direção, buscando-se causar o mínimo possível de supressas aos condutores. O DNER (1999) fornece uma série de recomendações para a elaboração de um bom traçado rodoviário. As principais recomendações são: *a)* deve-se partir dos dados de topografia e lançar arcos básicos de circunferência com desenvolvimento longo, conectando-os com tangentes curtas e espirais de transição, priorizando sempre curvas reversas ao invés de curvas sucessivas (as quais devem ser integradas em única curva, se possível); *b)* com exceção de rodovias bidirecionais de pista simples, nas quais é necessário permitir ultrapassagem ao longo de boa parte da rodovia, ou regiões muito planas ou vales, deve-se evitar tangentes muito longas; *c)* deve-se evitar o raio mínimo de curvatura para uma dada velocidade de projeto, sendo sua utilização restrita aos casos em que outras limitações impeçam a adoção de raios superiores; *d)* no caso de ângulos centrais pequenos, o desenvolvimento das curvas deve ser suficiente para evitar a aparência de quebra de alinhamento. Para ângulos centrais de 5°, é desejável extensão de no mínimo 150 m de curva. Este valor mínimo deve ser aumentado em 30 m para cada grau de diminuição; *e)* é recomendável que as curvas circulares sejam dotadas de curvas de transição, a fim de facilitar a dirigibilidade e, portanto, permitir condições operacionais mais favoráveis.

2.1.4.1 Concordância Horizontal

A geometria de uma estrada é definida pelo traçado do seu eixo em planta e pelos perfis longitudinal e transversal. De maneira simplificada, o traçado em planta é composto de trechos retos concordados por curvas horizontais. Em princípio, uma estrada deve ter o traçado mais curto possível. Porém, ligeiras deflexões, quando necessárias, podem harmonizar o traçado da estrada com a topografia local. Para concordar dois alinhamentos retos é muito utilizada a curva circular simples, devido a sua simplicidade para ser projetada e locada. O estudo deste tipo de curva é fundamental, pois mesmo quando se emprega uma curva de transição¹² a curva circular continua a ser utilizada na parte central

¹² Nesse contexto, as principais vantagens do uso de curva de transição são: i) fornecer uma trajetória natural para o veículo em que a força centrífuga cresce gradualmente na passagem da tangente para a curva circular, pois a curva de transição reduz ao mínimo a tendência de atingir a faixa de tráfego adjacente e tende a

da concordância (MACEDO, 2008). Segundo DNER (1999), na conexão de dois trechos em tangente há três tipos de concordância utilizados nos projetos rodoviários: a) curva circular simples (dois trechos em tangente são ligados por um arco círculo); b) curva circular composta (dois trechos em tangente são conectados por dois ou mais arcos de círculo sucessivamente tangentes girando no mesmo sentido) e c) combinação de curvas raios variáveis com curva de raio constante (a tangente é conectada com uma curva circular por meio de uma curva de raio variável – curva de transição – infinito na conexão com a tangente e igual ao raio da curva no ponto de tangência com a curva circular).

2.1.4.2 Raios Mínimos da Curvatura Horizontal

Corresponde ao menor raio de uma curva que, apresentando taxa máxima de superelevação, pode ser percorrida na velocidade de projeto, sob condições favoráveis de segurança e conforto. Adotando as hipóteses de que o veículo equivale a um corpo rígido e que as forças são aplicadas pontualmente ao centro de gravidade do veículo, criou-se um modelo físico que permite a obtenção deste raio mínimo, incluindo as seguintes forças: força peso, força normal de reação à força peso, e força de atrito lateral pneu pavimento. No que diz respeito ao raio máximo de curvatura, deve-se evitar a adoção de raios superiores a 5.000 metros, por prejudicarem a dirigibilidade (NETO *et al.*, 2016).

2.1.5 Superlargura

Conforme se observou na determinação dos raios mínimos as rodovias apresentam inclinações transversais em relação ao plano horizontal, com o objetivo de contrabalancear o efeito da aceleração centrífuga nas curvas. Dá-se o nome de superelevação à tangente do ângulo formado pela reta de maior declive da seção com o plano horizontal (NETO *et al.*, 2016). Todo veículo em movimento requer transversalmente e curvas um espaço suplementar em relação à situação em tangente. Essa necessidade decorre basicamente de considerações geométricas, das dimensões, configuração e operação do veículo e, por outro lado, do raio de curvatura de sua trajetória. Assim sendo, há a necessidade de se adicionar aos valores calculados com base nos requisitos geométricos uma parcela que reflita as influências exercidas sobre o motorista pelo movimento do veículo, especialmente em manter estável a trajetória do veículo em curva. Desta forma existe uma redução na capacidade de avaliar distâncias transversais devido à sensação de estreitamento da pista causada pela visão de curva em perspectiva, bem como pelo fato do motorista se encontrar sob ação da aceleração centrífuga. Os requisitos de ordem geométrica decrescem rapidamente de importância com o aumento do valor dos raios, enquanto a parcela que reflete influências dinâmicas sobre o motorista, de caráter empírico, decresce muito lentamente. Essas duas circunstâncias requerem que sejam fixados limites para a aplicação de superlargura as pistas rodoviárias. Essa necessidade é essencialmente realçada ao se ter em conta a elevada participação de caminhões no tráfego das rodovias (de até 60-70%, em alguns casos), o que aumenta sensivelmente a probabilidade desses veículos se cruzarem em uma

uniformizar a velocidade; b) uma curva de transição constitui o intervalo ideal para acomodar a variação da superelevação entre o trecho em tangente e a curva circular; c) a curva de transição facilita a implantação da superlargura na passagem do trecho de tangente para a curva circular e d) o uso da curva de transição elimina as aparentes quebras de alinhamento nas junções de curvas tangentes (DNER, 1999).

curva, situação tanto mais perigosa considerando a inércia e a menor dirigibilidade, requerendo larguras de pista adequadas para uma operação segura.

2.1.6 Superelevação

Os veículos em movimento curvilíneo são submetidos à ação de forças transversais que correspondem à força centrífuga. Para equilibrar esta solicitação, além da força de atrito entre o pneu e a pista, utiliza-se o artifício de se executar uma inclinação transversal da pista, com caimento para o lado interno da curva, denominada superelevação, de maneira que a força peso do veículo tenha um componente na mesma direção e em sentido contrário à referida força centrífuga. Se aumentarmos o raio da curva a força centrífuga diminui, sendo possível o equilíbrio unicamente com o atrito transversal, dispensando a superelevação. O desenvolvimento gradativo da superelevação (inclinação crescente) deve se dar ao longo do trecho da curva de transição, de forma que ao se iniciar o trecho da curva circular a inclinação transversal já seja a desejada. São fatores que influenciam o comprimento do trecho de transição: a) velocidade de giro da pista em torno do eixo de rotação; b) aparência visual e estética do alinhamento e c) intervalo de tempo em que ocorre o aumento da aceleração centrífuga entre a seção normal em tangente e a situação em curva circular. Por sua vez, o limite máximo imposto à superelevação é condicionado pelos seguintes fatores: i) operação com velocidade operacional bem abaixo da velocidade de projeto, ii) classe de projeto e iii) padrão de operação, comprimento de transição da superelevação com viabilidade prática e razões econômicas.

2.1.6.1 Alinhamento Vertical

Assim como no Alinhamento Horizontal, o desenvolvimento do projeto do Alinhamento Vertical deve prever mudanças de direção graduais e contínuas, minimizando as surpresas aos motoristas. Para tanto, são fornecidas diversas recomendações, dentre as quais destacam-se: a) O projeto de greide¹³ deve evitar ondulações de rampa frequentes e de menor vulto. Dar preferência a uma linha de greide suave, com mudanças graduais, e tão contínua quanto possível, evitando ainda realização de curvas verticais sucessivas no mesmo sentido; b) Deve-se evitar greides excessivamente colados ao terreno e que impliquem em alinhamento muito ondulado. Isso poderia acarretar em problemas de segurança, à medida que veículos em pontos baixos ficam ocultos, levando os condutores a terem a falsa impressão de oportunidades de ultrapassagem; c) Trechos extensos e sem curvas verticais devem ser analisados do ponto de vista das condições operacionais decorrentes, para desencorajar velocidades excessivas; d) Deve-se evitar curvas verticais côncavas em trechos de corte, a não ser que se possa garantir drenagem adequada.

2.1.6.2 Declividade de Rampa

A adoção de declividades longitudinais suaves atende a fatores relacionados ao desempenho operacional dos veículos, aos custos operacionais, à segurança da via e a aspectos associados ao consumo de combustível e controle da poluição. Por outro lado, deve-se adaptar o perfil longitudinal da via o mais próximo possível do relevo natural do terreno, visando a proteção ao meio ambiente e a redução dos custos de construção. As

¹³ Representa a linha longitudinal do perfil da estrada (alinhamento ou alinhamento reto).

rampas ainda têm grande influência sobre a capacidade da via, especialmente nas rodovias bidirecionais de pista simples, devido à perda de velocidade dos veículos pesados.

2.1.6.3 Curvas Verticais (Côncavas e Convexas)

Tem por função concordar as tangentes verticais dos greides, geralmente por meio de parábolas de 2º grau. Essas parábolas são definidas pelo seu parâmetro de curvatura, que representa o comprimento da curva no plano horizontal para cada 1% de variação longitudinal. O valor mínimo do parâmetro de curvatura, principal parâmetro de dimensionamento das curvas verticais, leva em conta simultaneamente a distância de visibilidade proporcionada e a máxima aceleração centrífuga radial admissível. Deve-se obedecer ainda a um comprimento mínimo absoluto da curva vertical, relativo a aspectos de aparência e conforto. As curvas verticais côncavas e convexas devem fornecer condições de visibilidade adequadas, no que diz respeito aos valores mínimos e desejáveis estabelecidos para as distâncias de visibilidade de ultrapassagem, no caso de rodovias bidirecionais de pista simples.

2.1.7 Largura das Faixas de Rolamento

É obtida adicionando à largura do veículo de projeto, a largura de uma faixa de segurança, em função da velocidade diretriz e do nível de conforto de viagem que se deseja proporcionar aos usuários. Os valores recomendados para pistas pavimentadas de rodovias rurais estão entre 3,00 m. e 3,60 m. Já, para rodovias urbanas recomenda-se a adoção das maiores larguras, entre 3,30 m. e 3,60 m.

2.2 Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS)

A crescente transformação de rodovias em espaços interativos, seguros, com soluções sustentáveis e orientadas ao usuário da via ganha maior relevância a cada dia. Os ITS têm papel determinante nessa transformação. Assim, para os propósitos desta seção em que se analisa segurança viária e conectividade veicular, o foco serão os sistemas inteligentes de transportes, promovida pela comunicação inter-veicular facilitada do protocolo DSRC e monitorada pelo TMC; tendo como referencial bibliográfico, Benke, Perez e Armendaris, 2017; NETO *et al.*, 2016; Dias, Andrade e Guedes, 2010; também como Vasconcellos, 2017 e a ANTP (2012), que discorrem sobre o “*Intelligent Transportation System Join Program Office – How ITS Technology has improved our quality of life*” e o “*Sustainable Highways Initiative*”, publicados em 2017 pelo USDOT (United States Department of Transportation) e o “*ITS Probe Vehicle Techniques*” publicado em 1998 pela FHWA (Federal Highways Administration) enquanto agência que apoia governos estaduais e locais no projeto, construção e manutenção de sistemas rodoviários nos EUA; da mesma forma se recorre ao “*European Strategies White Paper 2011*” e “*The themes of the Road Transport Strategy*” publicados em 2011 e 2017 pela EC (European Commission); as publicações da plataforma colaborativa global STA (Smart Transportation Alliance) e o “*Smart Roads: A Vision*” e “*A Strategic Road Research Agenda 2015-2025*”, ambos publicados em 2015.

2.2.1 Intelligent Transportation System - ITS

Os Sistemas Inteligentes de Transportes ou ITS, fornecem serviços inovadores relacionados ao transporte, gerenciamento de tráfego e permitem que os motoristas e

passageiros dos veículos sejam usuários mais bem informados e com maior acesso à tecnologia¹⁴. Estes sistemas englobam uma grande variedade de aplicações relacionadas à comunicação, com objetivo de trazer maior segurança à viagem, minimizar impacto ambiental, melhorar a gestão do tráfego e maximizar os benefícios dos usuários em geral. Os dispositivos gerenciados incluem painéis de mensagem variável (PMV), câmeras de circuito fechado de televisão (CFTV), detectores Bluetooth, câmeras de detecção de vídeo (VIDS), veículos conectados (TAG-SINIAV), dentre outros visam apoiar no que se descreve no Quadro 1 que apresenta um resumo da aplicação de iniciativas em países como: Europa, EUA, Japão e Austrália.

Quadro 1 – ITS - Resumo das Aplicações das Iniciativas

Aplicação	Europa	EUA	Japão	Austrália
Sistema de alerta de cansaço		X		
Adaptação inteligente de velocidade		X	X	
Sinalização de velocidade limite variável	X	X		
Visão noturna melhorada		X		
Proteção para pedestres e ciclistas em cruzamento		X		
Sistema de aviso de colisão	X	X	X	X
Aviso de desvio em relação à faixa ou à rodovia		X		
Sinais de velocidade aconselhável para caminhões		X		X
Alertas quanto às condições meteorológicas	X	X	X	X
Controle adaptativo da velocidade de cruzeiro		X	X	
Sistema de assistência em caso de acidente	X	X		
<i>Electronic Toll Collection (ETC)</i>			X	
Mensagens cooperativas	X	X	X	X
Segurança em interseções	X			X
<i>In-Vehicle Information</i>	X		X	
Avisos sobre eventos na pista	X		X	X
Rota dinâmica			X	
Comunicação DSRC	X	X	X	X

Fonte: Benke, Perez e Armendaris (2017).

Tudo isso é possível graças a que existem redes de sensores sem fio, dados coletados pelos sensores que há nos veículos, tecnologia de detecção de móveis, *drones*, etc., cuja comunicação é facilitada pelo protocolo DSRC sob o gerenciamento de TMC.

2.2.1.1 Rede de Sensores sem Fio

As redes móveis sem fio são sistemas de comunicação onde seus nós móveis se comunicam por meio de enlace de rádio. Há de dois tipos: Redes Infra estruturadas e Redes *ad-hoc*. Aqui nos referiremos às Redes *ad-hoc*, na qual entre os mais populares estão: *i*) WSN (rede de sensores sem fio) em que os nós de sensores¹⁵ são implantados na

¹⁴ Para Vasconcelos (2017), “A implantação de ITS em rodovias é o ato de dotá-las de equipamentos e sistemas que ajudam e agilizam a operação da mesma e o atendimento dos usuários, permite a comunicação entre o operador da rodovia e seus usuários e fornecem informações gerenciais para os gestores. Esses equipamentos são instalados ao longo da rodovia, em postos de operações e fiscalização, e os sistemas que coletam os dados e controlam estes equipamentos ficam localizados no Centro de Controle Operacional”.

¹⁵ São dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação. Quando dispostos em rede em um modo *ad-hoc* formam as redes de sensores. Eles coletam dados via sensores, processam localmente ou coordenadamente entre vizinhos e transmitem essa informação. Um nó na rede tem tarefas diferentes: sensoriamento do ambiente, processamento da informação e tarefas associadas com o tráfego.

área de destino para medir atributos específicos, como temperatura e pressão, e transmitir as informações medidas para uma estação base de processamento; *ii*) MANET (rede móvel *ad hoc*) em que os nós normalmente têm capacidade de processamento e de rede suficientes e podem conectar de forma autônoma e executar uma variedade de aplicativos; *iii*) WMN (rede de malha sem fio) no qual os nós têm capacidade de processamento semelhante às MANETs, porém algumas infraestruturas são normalmente utilizadas, principalmente para fornecer serviços de Internet a um grande número de dispositivos sem fio; VANET (rede veicular *ad-hoc*) em que os veículos estão equipados com transceptores que podem ser usados para trocar informações com intensidade de tráfego e advertências de colisão, ou para comunicação regular de dados e, as *iv*) VANETs que são classes especiais de MANETs, onde veículos agem como nós¹⁶ em movimento. As comunicações VANET podem ser classificadas em:

- . V2V (Veículo para Veículo), onde os veículos enviam mensagens para seus vizinhos com o propósito de melhorar a consciência do motorista sobre o seu entorno relacionado, assistência para troca de pista, alarme de colisão, assistência na velocidade na curva, etc.;
- . V2I/I2V (Veículo para Infraestrutura ou Infraestrutura para Veículo) em que a comunicação entre veículo e infraestrutura se dá ao longo da rodovia. O objetivo aqui é informar sobre as condições e riscos na rodovia aos motoristas, quanto a alarme de desastre, alarme de violação de velocidade, etc.;
- . Comunicação híbrida (V2V e V2I/I2V) que permite estender a área de cobertura das infraestruturas da rodovia. Dependendo da distância um veículo pode se comunicar com a infraestrutura da via e uma maneira única ou através de “saltos múltiplos”, ou seja, ele pode ou não acessar diretamente a unidade de comunicação da rodovia, permitindo assim a conexão de longa distância à Internet ou a veículos que estão distantes;
- . V2X (*Vehicle to Everything*) enquanto termo geral designado a qualquer tipo de comunicação que envolve o veículo: V2V, V2I/I2V e Comunicação híbrida e outras mais como comunicação com pedestres, ciclistas, motociclistas, etc.

2.2.1.2 “Probe Vehicle Data” ou “Floating Car Data” e “Mobile Sensing”

Diz respeito aos dados coletados pelos sensores que há nos veículos e contém informações de posição, podendo incluir informações de tração, aceleração, velocidade, ações do condutor (direção e frenagem), clima e condições da superfície da estrada, etc. Esses dados são processados estatisticamente podendo ser usados nos ITS para calcular a taxa de fluxo de tráfego, além de serem usados para prover informações das condições da rodovia e também para simulações futuras. Já, o termo “*Mobile Sensing*” se refere às tecnologias de detecção móveis utilizando dados coletados por sensores nos smartphones como GPS, acelerômetro, giroscópio, etc. O uso deste recurso é aplicável para analisar o comportamento dos motoristas e detectar padrões, tais como identificar reguladores de trânsito como semáforos e locais de parada obrigatória através de dados coletados dos sensores GPS existentes nos smartphones dentro dos veículos. Esses dados são processados com a aplicação de métodos estatísticos para a determinação dos locais de atenção, possibilitando assim o alerta aos motoristas¹⁷.

¹⁶ Componente que faz parte de uma rede. Na Internet, cada servidor constitui um nó. Os computadores que fazem parte de uma rede também são nós. A programação informática considera que um nó é cada um dos elementos de uma lista enlaçada, de uma árvore de busca binária ou de um grafo numa estrutura de dados. Cada nó tem a sua própria estrutura e conta com vários campos, entre os quais pelo menos um funcionará como referência para outro nó.

¹⁷ Há sistemas para detectar e avaliar anomalias da superfície da estrada, como buracos e solavancos através de uma técnica de processamento do sinal para extrair os componentes verticais da aceleração obtidas do

2.2.1.3 Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs

Também conhecidos como *drones* têm hoje aplicação prática na agricultura de precisão, segurança e vigilância, por exemplo. Todavia, sua aplicação pode se estender a outras¹⁸, tais como desastres ou crises onde podem ajudar na coleta de informações ou na proteção de ambientes críticos e perigosos como áreas nucleares e de difícil acesso. Todavia, nas frases de Benke, Peres e Armendaris (2017) se tem que os VANTs podem ser úteis nas inspeções e manutenção de infraestrutura de estradas, ferrovias, pontes, oleodutos e barragens. Manchas fracas, erosão ou desgaste podem ser detectadas por câmeras. O movimento de veículos pode ser facilmente monitorado. Assim, no que se refere a ITS para rodovias existe uma vasta possibilidade de aplicações para *drones* trazerem mais mobilidade em funções como: comunicação de acidentes, câmeras que se deslocam e podem ser os olhos do policial ou auxiliar o gestor da via no monitoramento da mesma, avaliando pontos de manutenção de forma eficiente.

2.2.2 Transportation Management Control – TMC

O centro de gerenciamento e operação de transporte é o núcleo do sistema de gestão de transportes. É onde as informações sobre a rede de transporte (malha rodoviária, sistema de sinalização de trânsito ou rede de veículos) são coletadas, processadas e combinadas com outros dados operacionais e de controle para produzir informações. A informação é então utilizada pelos operadores do sistema para monitorar as operações do sistema de transporte e iniciar estratégias de controle para efetuar possíveis intervenções na operação. É também onde os órgãos intervenientes podem coordenar suas respostas às situações e às condições do transporte. Além de ser o ponto focal para a comunicação de informações relacionadas com o transporte para a mídia e para os usuários da via.

2.2.3 Protocolo DSRC (*Dedicated Short Range Communication*)

Todos os benefícios antes citados são possíveis graças a estarem baseados em DSRC (Comunicações de curto alcance dedicadas), um derivado do Wi-Fi, porém definido para objetos de movimentos rápidos, permitindo assim que os veículos consigam transferir os dados estabelecidos (como velocidade ou posição, por exemplo) mesmo que não estejam em linha reta, referenciando-os aos receptores. Por outras palavras, os dados são transferidos mesmo que existam grandes obstáculos, como um edifício ou até mesmo no momento em que o veículo estiver fazendo uma curva, agregando assim, robustez ao sistema. As DSRC¹⁹ que foram projetadas pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*, ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), são canais de comunicação sem fio de uma ou duas vias, sendo de curto ou médio alcance. Essas comunicações são projetadas de forma específica para uso automotivo, sendo referidos

acelerômetro do smartphone. Nesse contexto, sistemas baseados em dados dos sensores dos veículos são efetivos em situações de desastre gerando mapas da rodovia ativos e permitindo compreender a intensidade dos danos causados ao sistema viário.

¹⁸ Existem projetos em estágios iniciais para a entrega de produtos e serviços comercializados pela Amazon e Walmart. BENKE, PERES e AMENDARIS (2017).

¹⁹ Consistem de Unidades Laterais (RSUs) e Unidades On Board (OBUs). As OBUs ficam dentro do veículo e possuem antena wireless para comunicações de curtas distâncias com outras OBUs e com as RSUs. Já, as RSUs são fixas ao longo da rodovia e são controladas pelo gestor da rodovia ou órgãos governamentais. Fabricantes do mundo inteiro estão na corrida por implementar veículos autônomos e inteligentes e vêm incorporando sensores, câmaras integradas, equipamentos laser, radar, LIDAR e GPS.

nos padrões: WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) para os EUA e ETSI ITS G5 para a Europa. Dentro da estrutura do V2X, esses tipos de comunicações são mais usuais nas formas V2V e V2I/I2V, visando atender os requisitos de segurança, confiabilidade em condições climáticas extremas e diminuição de atrasos de tempos entre os módulos de comunicações.

2.3 Infraestrutura de *Smart Highways*

Como se vê, a implantação dos carros elétricos já dá seus primeiros e inexoráveis passos, mas a infraestrutura das estradas ainda está devendo soluções inteligentes que aumentem a segurança e reduzam o desperdício de recursos. Várias organizações²⁰, sobretudo na Europa, desenvolvem projetos que tornam mais racionais as rodovias, ruas e áreas de estacionamento. A inglesa APUR - gigante da engenharia de projetos - revela que as rodovias do futuro serão feitas de materiais solares e controladas por tecnologias sofisticadas que se comunicam com carros, infraestrutura de estradas e sistema GPS. Nessa linha, a BMW aposta na ideia que as estradas do futuro sejam construídas sobre a atual estrutura viária das grandes cidades e tenham construção modular para baratear os custos. No caso, a conexão dessa autoestrada eletrificada com as ruas, rodovias e avenidas convencionais seria feita por meio de rampas e também daria acesso a estações de metrô e shoppings, para tornar o deslocamento das pessoas mais rápido. Já, para o Studio Roosegaarde e a Construtora Heijmans, da Holanda, as estradas do futuro serão duplamente brilhantes: por sua inteligência artificial, que as permitirá interagir com os veículos que circulam e fornecer abundante informação para a circulação e a segurança, e também por sua inovadora propriedade: a de brilhar no escuro. Outras empresas apostam no asfalto poroso para absorção de água, ou até placas solares para gerar energia para as vias, para os imóveis no entorno e, sim, também para carregamento em movimento dos carros elétricos, por indução. Seja como for, grande parte desses conceitos partem de mudanças na estrutura dos pavimentos para torná-los mais “inteligentes” e trazer segurança extra no transporte rodoviário. A seguir, detalhes dessas e outras iniciativas.

- **Estradas de Trilhos Eletrificados** - capaz de recarregar a bateria do carro ou caminhão durante seu percurso. A energia é transferida ao veículo por meio de um braço móvel que se conecta na parte inferior dos veículos em movimento e desliza junto com eles permitindo a recarga elétrica. É ele quem desliza sobre o trilho eletrificado e faz a conexão entre a eletricidade e o carro. A vantagem da estrada eletrificada é que permite uma espécie de “carregamento dinâmico”. O sistema ainda é capaz de calcular o consumo de energia por veículo e usuário. Em Estocolmo (Suécia), no âmbito do projeto eRoadArlanda foram instalados trilhos subterrâneos em trecho de 2 quilômetros que liga o aeroporto Stockholm Arlanda a uma área de logística de Roserberg, fora da capital.

- **Estradas de Painéis Solares** - formado de grandes placas solares (vidros de células fotovoltaicas e circuitos elétricos) no piso podem aproveitar a energia para iluminação, sinalização interativa por leds, derretimento do gelo e até carregamento de carros elétricos em movimento, numa faixa exclusiva de rolamento. A China inaugurou um trecho de via expressa que gera eletricidade a partir da luz do Sol. A primeira “estrada solar” da China

²⁰ Empresas como a Highways England e a Tarmac (Inglaterra), Plastic Road e Studio Roosegaarde e a Heijmans (Holanda), a Talga (Austrália), Electrek (China), a Qualcomm e a Integrated Roadways (USA), eRoadArlanda (Suécia), Alktroad (Israel), a Infravia (Brasil) e outras do tipo também avançam investindo em P&D já em fase de testes ou até mesmo em operação, evidenciando o surgimento de alternativas viáveis de estradas inteligentes que poderão alavancar a mobilidade elétrica.

foi inaugurada em Jinan, capital da província de Shandong. O trecho de 2 km pode converter a luz solar em eletricidade e transferi-la diretamente para a rede.

- **Estradas de Tintas Fotovoltaica** - nessa linha de raciocínio, na Universidade de Alberta, no Canadá, os pesquisadores estão trabalhando desde 2013 em uma tinta fotovoltaica à base de nanopartículas de fosforeto de zinco. O objetivo é que as superfícies nas quais a substância for aplicada funcione como painéis solares²¹. Por sua vez, cientistas no Instituto Nacional de Tecnologia de Ulsan e do Instituto Coreano de Ciência e Tecnologia, na Coreia do Sul, criaram uma tinta termoelétrica, que capta o calor residual das superfícies e o converte em energia elétrica. A substância contém partículas termoelétricas de telureto de bismuto e materiais que auxiliam a sintetização molecular.

- **Estradas Piezoelétricas** - quando o carro passa sobre o asfalto gera-se energia mecânica, resultado da pressão do peso e da velocidade sobre a superfície (geração de energia a partir da conversão de pressão mecânica em eletricidade). O desenvolvimento de materiais eficientes e baratos que possam transformá-la em eletricidade – chamados piezoelétricos – faz parte de uma corrida tecnológica na qual os países ricos vêm investindo pesado nos últimos anos. Agora, o Brasil também entra na briga²².

- **Pavimentos Silenciosos** – um método inovador de limitação de ruído através de camadas de desgaste porosas e, mais recentemente a camada de desgaste “*twinlayer*”, têm sido usadas em alguns países, notadamente na Holanda, como medida de redução de ruído. Uma redução do ruído pode também ser obtida através da utilização de camadas delgadas como a “*Poroelastic Surface*”, concebidas para controlar a textura e os vazios, introduzindo novos materiais como a borracha, e novos conceitos de pavimento como o “*Ecotechic Pavement*” e o “*Euphonic Pavement*”. PEREIRA *et al.*, 2007.

- **Estradas Digitais** – a americana Integrated Roadways, startup de base tecnológica, trabalha para substituir o pavimento asfáltico por placas de concreto incorporadas com tecnologia digital e conexão por fibra ótica. Essas placas conectariam os motoristas à internet e lhe forneceriam informações em tempo real sobre o tráfego, as condições da estrada e os acidentes. A expectativa é que o “*Smart Pavement*” sinta as posições, o peso, a velocidade e a localização exata dos carros. Assim, por exemplo, nos casos de acidentes, ela (a estrada) poderia ainda convocar ambulâncias até o local.

- **Estradas de Indução Magnética** - um sistema instalado sob o asfalto nas rodovias evita que motoristas precisem parar para recarregar as baterias (mesmo princípio usado nos carregadores sem fio para celulares). Cabos elétricos enterrados sob o asfalto produzem campos magnéticos, que são absorvidos por um receptor no carro e convertidos em

²¹ No Brasil, o instituto de pesquisa CSEM Brasil, de Minas Gerais, também produziu uma tinta orgânica capaz de captar energia solar. O produto consiste em uma fita de polímeros e plástico – leve, maleável e transparente – na qual a tinta fotovoltaica é impressa. A tecnologia empregada é a *Organic Photovoltaic* (OPV, sigla em inglês para células fotovoltaicas orgânicas). Essas fitas podem ser instaladas em diversos locais, como fachadas de edificações, vidros e etiquetas.

²² Segundo Elson Longo, pesquisador da Universidade Estadual Paulista (Unesp), “há uma concorrência mundial nessa área. Todos os países desenvolvidos estão fazendo pesquisas”. Ele já produziu em laboratório um material que promete ser mais barato do que os disponíveis atualmente. “A cerâmica piezoelétrica que se faz hoje demora de 30 a 48 horas para ficar pronta – e isso em quantidades muito pequenas”, diz. “Usando outro processo, que envolve micro-ondas, conseguimos fazer o mesmo em apenas uma hora”, explica.

eletricidade²³. Esse tipo de “recarga automática” de carros elétricos nas estradas já está em funcionamento em alguns lugares. Em 2013, a cidade sul-coreana de Gumi reconstruiu uma rua de 12 km permitindo que ônibus elétricos sejam recarregados enquanto trafegam. A empresa PowerbyProxi da Nova Zelândia (adquirida em 2017 pela Apple) já construiu um grande “*power pad*” que pode realizar o carregamento sem fio de um carro elétrico estacionado. O próximo desafio é efetuar o carregamento sem fio na superfície da estrada, com o carro em movimento.

- **Estradas de Betão** - desenvolvida a partir de compostos que podem ser usados como condutores de eletricidade. Através de pesquisa se conseguiu criar um aditivo de grafeno, grafite e sílica que consegue transformar betão num material altamente condutivo. A ideia é que seja possível fazê-lo com o veículo parado ou em andamento. Uma vez que o betão vai conduzir calor facilmente, e não precisa de muito grafeno misturado, o custo de produção pode ser extremamente baixo. Vai ser preciso instalar um transmissor visível no asfalto usado para cobrir o betão, que vai servir como camada de base.

- **Plástico Armado** - três multinacionais europeias estão investindo pesadamente em pisos de plásticos reciclados, pré-moldados, e com vãos inferiores (estrutura plástica e galerias – cabos e tubos) capazes de colocar em prática boa parte das outras tecnologias vistas aqui. Segundo a PlasticRoad, um protótipo dessa estrada – inicialmente em forma de ciclovia – deverá entrar em funcionamento no fim deste ano na Holanda, país que cada vez mais se transforma num laboratório de experiências de mobilidade.

- **Asfalto Poroso (ou, Concreto Permeável)** – o projeto (camada absorvente e estrutura de drenagem), da gigante inglesa da construção Tarmac, já foi colocado em prática num estacionamento experimental e pode ser usado em ruas, calçadas e estradas. Além de evitar alagamentos e aquaplanagem dos veículos, esse piso facilita a absorção da água, evitando erosões e prolongando a vida útil da estrutura viária. Outro benefício desse material é possuir uma cor mais clara em comparação ao concreto tradicional, refletindo luz solar e permanecendo mais frio no verão. A aquaplanagem é um dos fatores que sempre merecem atenção ao analisar a segurança de uma rodovia. Uma solução que evita esse fenômeno, prolonga a vida útil da estrutura dos pavimentos e ainda diminui os riscos de alagamento é o “*Thirsty Concrete*” ou concreto sedento, criado pela empresa inglesa Tarmac. Composto por uma superfície permeável, o asfalto absorve a água da chuva a partir de um sistema de rochas e a armazena num reservatório.

- **Luz sob Demanda** – ou estradas luminosas (asfalto e tintas luminescentes ou sensores de movimento e leds), em vez de desperdiçar energia com postes de luz em estradas de pouco movimento noturno, sensores no pavimento podem iluminar a pista somente quando o carro passa (e a luz vai acompanhando a passagem do carro por toda a viagem). Outra tecnologia já em testes na Holanda²⁴ é a tinta fotoluminescente, que absorve a luz

²³ A Qualcomm, conhecida por fabricar chips para smartphones, propôs carregamento wireless para carros elétricos terem maior autonomia na própria estrada, sem necessidade de fios ou de paradas durante a viagem. A tecnologia é composta por uma corrente de carregamento indutivo que ocorre enquanto o veículo se move sobre um pavimento especial. Apesar de parecer futurista, esse modelo de transmissão de energia sem fio tem mais de um século de história – por meio de um processo conhecido como “indução eletrodinâmica”, o inventor austríaco Nikola Tesla conseguiu, em 1899, acender uma lâmpada sem o uso de qualquer cabo de energia.

²⁴ As empresas Heijmans e Studio Roosegaarde, criaram as “*Glowing Lines*” ou Linhas Brilhantes que fazem com que os clássicos postes de luz nas estradas sejam substituídos por faixas de tinta fotoluminescente que absorvem a energia proveniente do sol durante o dia e à noite, brilham no escuro.

do dia e faz as faixas divisórias de pistas brilharem intensamente no escuro. Nessa linha, no Instituto Real de Tecnologia de Melbourne, na Austrália, os cientistas criaram uma tinta solar que absorve vapor d'água e, a partir dele, produz hidrogênio. Isso acontece por meio da mistura de um novo composto, chamado sulfureto de molibdênio sintético, a partícula de óxido de titânio.

- **O modelo de vala técnica do Sistema INFRAVIA** - o modelo inclui elementos de sustentabilidade ambiental, social e econômica, relacionados ao planejamento e cadastro urbano, integração entre o desenho urbano e as infraestruturas subterrâneas, eficiência, economicidade, transparência pública e programas ambientais e comunitários. O modelo substitui as redes de infraestrutura construídas sob as ruas e concentra estas na calçada e ciclovia, em um sistema subterrâneo, reduzindo as intervenções na rua durante a construção, manutenção, operação e expansão destas instalações. O sistema subterrâneo substitui a construção individualizada e engloba estas redes em uma única vala na calçada, inseridas em uma calha feita de plástico reciclado, projetada com o conceito de dispositivo à prova de falhas. (SILVA, 2017).

2.4 Carro Elétrico (Autônomos e Conectados) e sua Bateria

O projeto de engenharia de estradas é condicionado, dentre múltiplas variáveis, pelas características do terreno e o uso funcional que lhe será dado à rodovia. Todavia, em retrospectiva observa-se que tem sido o veículo que circula por ela quem acaba determinando as especificidades do projeto geométrico. Desta vez, em função da crescente implantação de *carros elétricos* em substituição ao de combustão interna, mas principalmente devido à incorporação de tecnologia embarcada neles através de dispositivos eletrônicos e *softwares*, especula-se, advirão mudanças relevantes no traçado de projetos geométricos em rodovias novas a construir, tanto como nas que já estão em uso e deverão ser remodeladas. Em termos de força motriz, se tem que ainda demandam de maior autonomia para garantir o conforto dos usuários e é previsto que esta advenha, entre outras alternativas, da recarga da bateria do veículo em movimento proporcionado pelas *Smart Highways* e tecnologias como o *Smart Grid* e *Vehicle to Grid* (V2G) que melhoram sua eficiência. Para os propósitos desta seção em que se busca analisar as especificidades do carro elétrico enquanto veículo de projeto, o foco será o estudo dos autônomos e conectado e terá como referencial bibliográfico os estudos realizados por Baran e Legey, 2010; Castro e Ferreira, 2010; Vaz, Barros e Castro, 2012, além Peres, 2017, Dias, Andrade e Guedes, 2010; Castro, Moszkowicz e Lima, 2018; Benke, Perez e Armendaris, 2017; Vasconcellos, 2017 e Villanueva e Silva, 2020. A seguir, sua conceituação:

2.4.1 Carro Elétrico ou *Battery Electric Vehicle*

São veículo que utilizam propulsão por meio de motores elétricos. É composto por um sistema primário de energia, uma ou mais máquinas elétricas e um sistema de acionamento e controle de velocidade ou binário. Atualmente, diversos recursos tecnológicos como freios ABS, comunicação inter-veicular e outros recursos, já

Essa tecnologia permite que ao pavimento emita luz por até dez horas, alternativa segura e sustentável para a iluminação das rodovias. Essas empresas, sob o conceito de "*Smart Highways*" que integra em conjunto também pistas específicas para recarregar carros elétricos, luzes controladas por sensores e marcadores de temperatura do pavimento.

automatizam processos específicos de um veículo (os sistemas de apoio à condução vão evoluindo, cada vez mais, para sistemas de condução autónoma), porém a decisão final de navegação ainda é do condutor humano²⁵. Os veículos elétricos não emitem quaisquer gases nocivos para o ambiente, nem emitem ruído considerável, uma vez que motores elétricos são mais silenciosos que os de explosão; porém, seu maior torque dá aceleração imediata às rodas sem desperdício de energia. Já, a bateria é o principal componente do carro elétrico (no caso dos automotores é o motor). É ela que fornece o “combustível” que o movimenta; porém, esta ainda apresenta problemas de autonomia e tempo de vida. Além disso, o peso da bateria é ainda um dos maiores obstáculos para o desenvolvimento dos carros elétricos. Trata-se de física simples: com mais peso, o motor do carro elétrico faz mais esforço para tirá-lo da imobilidade, o que aumenta o consumo de energia. O mesmo se aplica para a sensibilidade às fortes oscilações de temperatura que mermam seu desempenho e os riscos da alta tensão da bateria que pode superar os 500 volts.

2.4.2 Carros Autônomos e Conectados

O carro autônomo (*self-driving car*) também conhecido como veículo robótico ou veículo sem motorista, designa qualquer veículo terrestre com capacidade de transporte de pessoas ou bens sem a utilização de um condutor humano. O seu principal objetivo é integrar um conjunto de tecnologias de sensores, de sistemas de controle e atuadores para sensoriar o ambiente, determinar as melhores opções de ação e executar estas ações de forma mais segura e confiável do que poderia ser obtida por um condutor humano comum. Os veículos autônomos, assim, têm como objetivo substituir o condutor humano por um sistema de controle computacional que integre os recursos tecnológicos do veículo. Veículos autônomos contêm no seu interior, sensores, câmaras e tecnologia de localização para operar de maneira segura sem a interferência do motorista.

Já os conectados, não necessariamente autônomos, usam a tecnologia wireless²⁶ para compartilhar informações e localização com outros veículos (V2V); com a infraestrutura (V2I/I2V) ou com outros modais, como por exemplo, nuvens na internet, pedestres, ciclistas (V2X). Esses carros têm muitos softwares a bordo e estão sempre on-line com sistema semiautônomo de direção, que poderá assumir até 90% das funções de direção do veículo, embora não descarte a presença de um motorista. Assim, o painel tem instrumentos digitais e os sistemas de assistência são referência em termos de conectividade e segurança.

2.4.3 Autônomos e Conectados – Classificação por Níveis de Autonomização

A classificação de um carro como autônomo ou não (apenas conectado) depende, naturalmente, da intervenção do motorista na interação com a condução do veículo. Há um consenso a nível mundial, entre as várias entidades que têm procedido a esta classificação, sobre os níveis de autonomização dos carros. Em 2014, a Sociedade Internacional de Engenheiros Automóveis (SAE), classificou a autonomização em níveis: do primeiro nível em que é necessária a intervenção constante do motorista e o carro está desprovido de qualquer sistema de ajuda à condução, ao último nível em que o sistema é

²⁵ A conectividade veicular vai muito além do sistema que oferece ao motorista informações em tempo real sobre hotéis, restaurantes, estacionamentos e teatros e o conecta automaticamente ao serviço de socorro no caso de um acidente. Estima-se que automóveis vão literalmente “conversar” entre si e com centrais de controle, organizando de forma objetiva o trânsito urbano e nas rodovias.

²⁶ Chamada DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*), entretanto algumas funções podem usar o smartphone ou outros tipos de comunicação.

totalmente autônomo, dispensando qualquer intervenção do motorista. A seguir o detalhamento desses níveis:

Nível 0 - Tudo é controlado pelo motorista humano. Não existem sistemas de *Cruise Control*, assistência à travagem, nem qualquer outro tipo de auxílio à condução;

Nível 1 - Existe um ou mais sistemas de ajuda à condução, no entanto o motorista tem de assumir o controle frequentemente;

Nível 2 - Existem vários sistemas de ajuda à condução, no entanto o motorista é obrigado a detectar a presença de obstáculos e a assumir o controle do veículo quando necessário;

Nível 3 - É o primeiro nível mais avançado, com uma condução “semiautônoma”, e que em alguns países já requer autorizações para utilização na via pública. Permite que o motorista desvie a atenção da estrada em determinadas situações, já que o sistema detecta a presença de outros veículos e consegue ler a maioria da sinalização vertical. O motorista deve estar preparado para assumir o controle se e quando necessário;

Nível 4 - É o nível já muito avançado de condução autônoma em que o automóvel é capaz de controlar tudo em redor. Por questões de segurança o motorista, no entanto, pode ter que intervir. Já existem construtoras de veículos com automóveis com condução autônoma nível 4, no entanto a legislação da maior parte dos países ainda não permite que esta funcione a 100%.

Nível 5 - É o nível máximo. A definição do destino, o arranque do motor e todas as manobras são efetuadas de forma 100% autônoma, não sendo necessária qualquer intervenção humana na condução.

2.4.4 Tecnologia LIDAR e Sistema *Cruise Control*

A tecnologia LIDAR é o sistema base da condução autônoma à medida que pode ser utilizada em plataformas móveis ou fixas (carros circulando ou estacionados)²⁷. É uma tecnologia óptica de detecção remota que mede propriedades da luz refletida de modo a obter a distância e/ou outra informação a respeito de um determinado objeto distante, através da tecnologia de Laser²⁸. O método mais utilizado para determinar a distância a um objeto é a utilização de laser pulsado. A distância a um objeto é determinada medindo a diferença de tempo entre a emissão de um pulso laser e a detecção do sinal refletido, de forma semelhante à tecnologia do radar, que utiliza ondas de rádio. A tecnologia LIDAR é aplicada em inúmeros setores de projetos e engenharias, sobretudo para levantamentos topográficos e elaboração de modelos digitais. Analisa-se, em geral, estradas e áreas com potencial para a construção delas e linhas de transmissão para controle do crescimento urbano, por exemplo.

Já o Sistema *Cruise Control*, também conhecido como *Speed Control* ou *Autocruise* é um sistema que mantém a velocidade de condução de um veículo previamente programada. Uma vez atingida e memorizada a velocidade pretendida, pode-se retirar o pé do acelerador, permitindo assim um maior conforto da condução em estrada ou em viagem, à semelhança do que faz o “piloto automático” nos aviões comerciais de carga e de passageiros. Nos veículos com caixa de velocidades manual (caixa de marcha) o regulador de velocidades não funciona na primeira mudança engrenada. O sistema

²⁷ O sistema a laser mais utilizado para a obtenção de informações espaciais, produzindo Modelos Digitais do Terreno e da Superfície, é o perfilamento em plataforma móvel aerotransportada. O LIDAR combina o Sistema de Navegação Global por Satélites (GNSS) e o Sistema de Navegação Inercial (INS). O GNSS fornece a localização da aeronave no espaço, enquanto o INS informa os ângulos de atitude dela. Os resultados obtêm-se pelo cálculo do tempo decorrido da emissão do pulso laser ao alvo e o seu tempo de retorno ao sensor. Converte-se o tempo em distância, a partir da velocidade da luz, e associa-se esta a informações de posicionamento, para que resultem nas coordenadas 3D do alvo. Os pulsos laser são emitidos sob uma taxa de frequência de repetição e realizam uma varredura perpendicular à direção da linha de voo. Dessa forma, o sensor laser pode atingir múltiplas reflexões, ou seja, vários pulsos podem ser refletidos sob um mesmo objeto, o que acarreta uma alta precisão nos resultados das análises.

²⁸ Por ser um sensor remoto ativo, ou seja, envia sinais à superfície da Terra e regista o sinal refletido, não é afetado pela falta de luminosidade nem por outras variáveis como as condições climáticas.

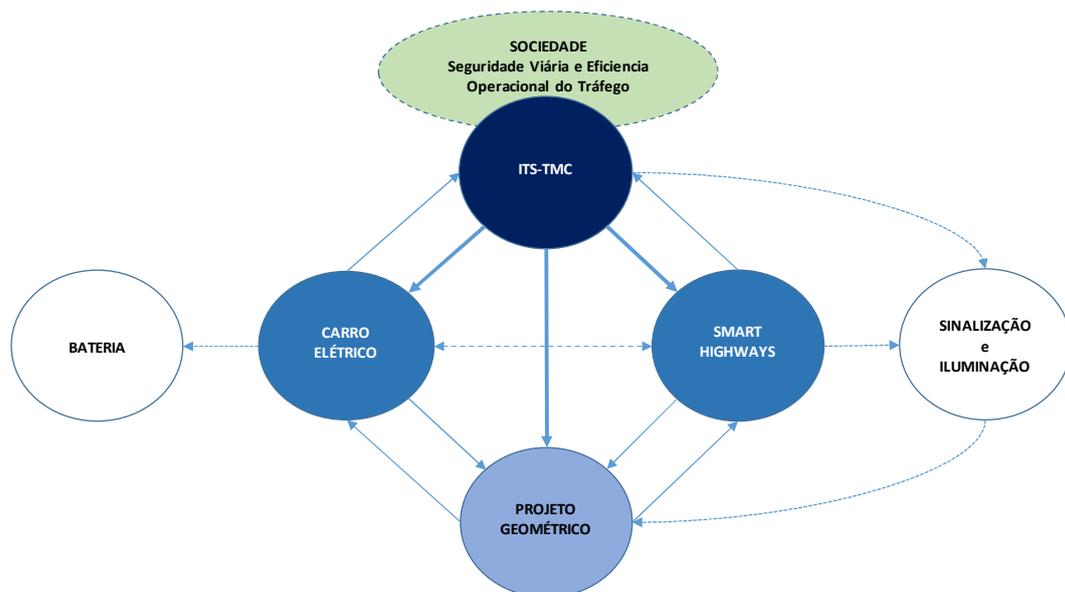
basicamente funciona fazendo a comparação entre as velocidades do veículo e a programada de forma a fazer a compensação entre as mesmas. Dotado ainda de um complexo sistema computacional de segurança, o sistema torna-se inoperante quando o motorista interage com algum comando do veículo.

3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A revisão da literatura quanto às macro variáveis que impactam o projeto geométrico, desvela - de fato - uma clara e consistente interatividade entre elas, uma influenciando noutra e vice-versa, numa progressiva retroalimentação em espiral positiva que lhe sugere um caráter evolutivo e irreversível ao processo. Todavia, percebe-se sobreposição de uma sobre as outras. É o caso dos sistemas inteligentes de transportes (ITS-TMC) que em certa forma estabelecem as “regras do jogo” que organiza essa interatividade dinâmica e holística, incidindo com maior peso sobre carro elétrico, *smart highways* e projeto geométrico. Pondera-se isto ocorra porque ITS-TMC estariam mais próximos de quem faz a demanda em termos de segurança de usuários e eficiência operacional do tráfego. Isto é, a própria sociedade cada vez mais consciente e engajada com seu próprio destino.

A Figura 2 busca descrever o “predomínio” que ITS-TMS têm sobre as outras variáveis, pautada que está pelas demandas de uma sociedade comprometida e engajada com seu próprio destino no que tange à seguridade viária e eficiência operacional do tráfego. A partir da constatação que sistemas embarcados em carro elétrico e *smart highways* são eficientes de *per si*, mas só ganham sentido e maior relevância diante dos propósitos dessa sociedade à medida que interagem e “deixam-se” nortear por aquelas é que, não apenas alcançam seu objetivo, como contribuem para girar a espiral positiva. Nesse contexto, o projeto geométrico é subjacente a esses avanços.

Figura 2 – Interatividade holística de macro variáveis e projeto geométrico.



Fonte: Elaboração Própria, com base na revisão bibliográfica.

A seguir apresenta-se as premissas aventadas para cada marco variável, dada a lógica que lhe dá amparo e sustentação, e na sequência especula-se sobre o que poderá mudar no

projeto geométrico em função das inovações e mudanças analisadas, próprias para cada caso, e logo em seguida estabelecidos os efeitos esperados.

3.1 Carro Elétrico (Conectado e Autônomo) e sua Bateria

À medida que o carro elétrico se assemelha cada vez mais a um “computador que se move” e nesse contexto, num primeiro momento relativiza a função do motorista (carro conectado), para na sequência simplesmente dispensa-lo (carro autônomo), tem-se que questões associadas aos elementos de projeto e parâmetros geométricos são impactados e demandam o seu recálculo. Quer dizer, à medida que carro e motorista passam a ser monitorados, no sentido de “controlados”, tanto pelas *smart highways* quanto pelos ITS, entende-se que “doma-se” uma das variáveis comportamentais mais arreadas e que historicamente condicionaram a engenharia rodoviária. É o que apontam as análises apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Premissas, Lógica e Efeito Esperado – Carro Elétrico (Conectado e Autônomo)

PREMISSAS	LÓGICA	EFEITO ESPERADO
CARRO ELÉTRICO (CONECTADO E AUTÔNOMO) E SUA BATERIA		
- Maior peso total (Kg) do carro elétrico em relação ao carro a combustão interna.	- Maior dimensão e peso da bateria na composição total do carro elétrico e Carroceria feita de aço.	- Exige Pavimento mais resistente e durável. - Exige Curvas Verticais (Côncavas e Convexas) e Rampas (Ativas/Declives) menos acentuados e mais suavizados. - DVP e DVTD demandam novos cálculos. Frenagem de carros mais pesados demandam de maior distância.
- Carro Conectado (comando parcial do motorista), adere ao conceito de "computador que se move".	- Níveis 2 e 3 de Autonomização vêm sendo desenvolvido - Incorpora Dispositivos Eletrônicos e <i>Softwares</i> . - Crescente interatividade com ITS-TMC e <i>Smart Highways</i> . (relação V2V, V2I/I2V e V2X é consistida).	- Veículo de Projeto, Velocidade de Projeto e Distâncias de Visibilidade são relativizados sob esta condicionante. - Alinhamentos Horizontal e Vertical são relativizados e redimensionados sob esta condicionante.
- Carro Autônomo (dispensa do motorista no comando), adere ao conceito de "computador que se move".	- Níveis 4 e 5 de Autonomização vêm sendo desenvolvido - Incorpora Dispositivos Eletrônicos e <i>Softwares</i> . - Crescente interatividade com ITS-TMC e <i>Smart Highways</i> . (relação V2V, V2I/I2V e V2X é consistida).	- Veículo de Projeto, Velocidade de Projeto e Distâncias de Visibilidade são relativizados sob esta condicionante. - Alinhamentos Horizontal e Vertical são relativizados e redimensionados sob esta condicionante.
- Carro Elétrico circula a menor velocidade (Km/h) que o Carro Automotor.	- Níveis de segurança e conforto, associados a tráfego eficiente permite transitar mais lento; porém chegar em tempo ao destino. - Menor quantidade de veículos em circulação.	- Elementos de Projeto são relativizados. - Traçado e Dimensões (largura da pista, quantidade de pista de rolamento e acostamento) são ré-calculados e espaços de lazer e áreas verdes ganham relevância na concepção das obras de arte.
- A bateria do Carro Elétrico é sensível às oscilações extremas do clima, além do que o aumento de sua autonomia é de vital importância para o conforto dos usuários.	- Calor excessivo ou Frio intenso prejudicam a vida útil e afetam o desempenho da bateria (durabilidade da carga) - Propostas de recarga do veículo em movimento vêm sendo desenvolvidas sob o conceito <i>smart highways</i> . - Conceitos <i>smart grids</i> e V2G são consistidos.	- Pavimento (camada de fundação e camada de desgaste) demandam novos materiais (alternativos e substitutos). - Pavimento é concebido como "fonte" de recarga das baterias dos carros em movimento. - Ruas e Estradas são concebidas com protetores.

Fonte: Elaboração Própria, com base na revisão bibliográfica.

3.2 *Smart Highways* - “fonte” de Recarga da Bateria e “meio” de Sinalização

De igual forma, à medida que *smart highways* não são apenas rodovias por onde circulam veículos, contrariando a posição passiva do passado; mas, agem como elo de ligação com o carro através do “fornecimento” de energia elétrica para sua bateria em pleno movimento, verifica-se que reverte a posição e ainda adota postura pró ativa à medida que passa a cuidar da seguridade viária apoiada na conectividade veicular, comportando-se como “meio” de sinalização e iluminação das estradas. Por fim, à medida que apresenta materiais alternativos e substitutos aos tradicionais asfalto e concreto; pondera-se que mais uma vez haverá impacto no desenho de projetos geométricos, principalmente no que se refere ao pavimento. É o que se desprende das análises observadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Premissas, Lógica e Efeito Esperado – Infraestrutura de *Smart Highways*

PREMISSAS	LÓGICA	EFEITO ESPERADO
SMART HIGHWAYS E RECARGA DA BATERIA DO CARRO EM MOVIMENTO		
- Novos Materiais alternativos e substitutos ao asfalto e concreto convencional são aplicados na pavimentação de Rodovias.	- Uso de Painéis Solares; Concreto Permeável (Asfalto Poroso); Betão com aditivo de grafeno, grafite e sílica; Cerâmica Piezoelétrica; Pisos de Plástico Armado (reciclado e pré-moldado).	- Pavimento (camada de fundação e camada de desgaste) demandam novos cálculos. - Superfície de rolamento demanda novos cálculos no que se refere a rugosidade, ondulações, aderência, etc.) - Curvas Verticais (Côncavas) e Rampas mais acentuadas usam materiais que facilita a drenagem.
- Novos Conceitos são aplicados à Estrada e demanda-se dela interatividade associada à segurança viária e conectividade veicular que privilegie a eficiência operacional do tráfego.	- Aplicação de conceitos de Estradas Digitais; Estradas Luminosas; Estrada de Tinta Fotovoltaica; Vala Técnica Infravia. - No âmbito dos Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS e TMC) passam a interagir enquanto infraestrutura na relação V2I/I2V e potencializam a relação V2V e V2X.	- Pavimento (camada de fundação e camada de desgaste) demandam novos cálculos. - Obras de Arte são redimensionadas e Postes e Sinalizadores Verticais são relativizados. "Fase" de Sinalização passa a ser redimensionada. - Alinhamentos Horizontal e Vertical são relativizados e redimensionados sob esta condicionante.
- Nova Funcionalidade é demandada à Estrada como "fonte" de recarga da bateria do veículo em movimento.	- Aplicação de conceitos tais como: Indução Magnética; Painéis Solares; Cerâmica Piezoelétrica; Trilhos Eletrificados e Tinta Fotovoltaica. - Conceitos <i>smart grids</i> e V2G são consistidos.	- Pavimento (camada de fundação e camada de desgaste) demandam novos cálculos - Obras de Arte são redimensionadas e Postes e Sinalizadores Verticais são relativizados. "Fase" de Sinalização passa a ser redimensionada.

Fonte: Elaboração Própria, com base na revisão bibliográfica.

3.3 ITS-TMC e Rodovias Inteligentes

Por fim, como sistemas inteligentes de transportes interagem e predominam sobre carros elétricos e infraestruturas de *smart highways*, tornando-os ainda mais eficientes do que seriam individualmente; pondera-se que relativiza ainda mais os elementos de projeto e parâmetros geométricos, tornando consistente e inadiável a necessidade de repensar todas as fases da engenharia de projetos de estradas, incluindo nela a “fase” de sinalização e conservação. Assim, neste caso, o ponto de partida para a análise prospectiva da inovação em engenharia rodoviária será a premissa de que tudo é possível, à medida que o desenvolvimento de carros autônomos e conectados prosseguirá, conduzindo à necessidade de fazer evoluir a categoria da estrada para o nível de rodovia inteligente, onde “*no futuro será a estrada que comandará o automóvel*”. PEREIRA *et al.*, 2007. Sob esse contexto, seguem as análises apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Premissas, Lógica e Efeito Esperado – ITS-TMC (Rodovias Inteligentes).

PREMISSAS	LÓGICA	EFEITO ESPERADO
ITS-TMC E RODOVIAS INTELIGENTES		
- Menor quantidade de veículos circulando melhoram a eficiência do trânsito.	- Serviços de viagens compartilhadas (Uber) - Cai o número de proprietários de veículos	- Diminui largura de Rodovias e Ruas passam a ser mais estreitas, dando espaço a mais áreas verdes e de lazer - Garagens e Estacionamentos são reduzidos e dão espaço a mais áreas verdes e áreas de lazer
- Maior peso total (Kg) do carro elétrico em relação ao de combustão interna.	- Gestão de infraestrutura (avalia estado de conservação, qualidade do serviço entregue e uso correto da via).	- Exige Pavimento mais resistente e durável e níveis mais elevados de manutenção periódica, além de investimento na ampliação da pista de rodagem e constantes revisões na sistemática de sinalização.
- Carro Conectado (comando parcial do motorista) e Carro Autônomo (dispensa do motorista no comando) adere ao conceito de "computador que se move".	- Gestão de tráfego (garantia da fluidez do tráfego, segurança e controle das situações de emergência).	- Conceitos de velocidade de projeto e distâncias de visibilidade são relativizadas, além do que a velocidade média de operação passa a ser intermitente não apenas nos espaços ao longo da via, mas também em função de horários em determinados horários do dia.
- Infraestrutura de <i>smart highways</i> contribui para a segurança do usuário e a eficiência do tráfego.	- Gestão de intervenção (planejadas/não planejadas) e Gestão de incidentes (prevenção/resposta a incidentes) - Crescente interatividade com ITS-TMC e <i>Smart Highways</i> . (relação V2V, V2I/I2V e V2X é consistida).	- Fase de Sinalização é relativizada.

Fonte: Elaboração própria, com base na revisão bibliográfica.

3.4 Sumário dos Efeitos Esperados sobre o Projeto Geométrico.

O carro elétrico enquanto “computador que se move” não só livra-se das limitações operacionais do condutor humano, como alavanca sua própria eficiência mecânica e melhora seu desempenho na via; mas, principalmente, constitui-se no elo de ligação com as tecnologias embarcadas na infraestrutura de *smart highways* e nos dispositivos ITS-TMC, permitindo inclusive inverter a relação de predomínio que havia no passado, cedendo seu espaço para que no futuro a estrada não só comande o carro, mas o “alimente” recarregando sua bateria e lhe dê maior autonomia. Nesse contexto, conceitos já consolidados na engenharia rodoviária são relativizados, perdem relevância e noutros casos demandam de recálculos. Tudo isto num ambiente em constante mudança e necessária adequação promovida pelos avanços tecnológicos, fazendo com que projeto geométricos tenham de ser concebidos sob critérios de flexibilidade, escalabilidade e capacidade adaptativa.

4 CONCLUSÕES

O objetivo da pesquisa foi analisar o impacto que a tecnologia embarcada em carros elétricos, infraestrutura de *smart highways* e sistemas inteligentes de transportes tem sobre o projeto geométrico, notadamente no que se refere aos elementos de projeto e parâmetros geométricos. Para tanto, recorreu-se a pesquisa exploratória com propósitos de analisar essa relação de causa-efeito num contexto de seguridade viária e a conectividade veicular. Os efeitos esperados sobre o projeto geométrico decorrentes desse impacto foram ventilados à luz de premissas aplicadas sobre as macro variáveis e apoiadas na lógica que lhes dá sustentação. A resultante foi que alguns elementos de projeto como a velocidade diretriz e as distâncias de visibilidade têm de ser relativizadas à medida que o carro elétrico, enquanto “*computador que se move*”, suplanta as limitações do motorista e desmistifica essas variáveis comportamentais. O mesmo se observa no alinhamento horizontal e vertical, onde a preocupação não é mais evitar tangentes muito

prolongadas, mas os efeitos da força centrífuga aplicada sobre um veículo menor, mais pesado e que circula em menor velocidade de operação que a observada na era do automotor. Ainda nessa linha de raciocínio, pondera-se que a “fase” de sinalização também sofra impacto e seus processos sejam relativizados à medida que dispositivos ITS-TMC equacionam a segurança dos usuários e a eficiência operacional do tráfego através do uso da tecnologia. Todavia, a própria infraestrutura das *smart highways*, além de agir como “fonte” de recarga da bateria do carro em movimento, também propõem suprir demandas de sinalização comportando-se como “meio” para aquilo. Contudo, apesar do levantamento efetuado e os resultados preliminares obtidos, a “busca” por efeitos esperados não pretende ser aqui limitativa e menos ainda conclusiva, pois que o tema se revela embrionário e, portanto, não se esgota, mas desvela uma instigante linha de pesquisa a ser explorada. Todavia, a grosso modo, a pesquisa permitiu aventar que: *i)* o carro elétrico deixa de ser determinante na engenharia rodoviária como o foi no passado, pois ITS-TMC passam a monitorá-lo, controlando-o de forma a restar-lhe “vontade própria”, permitindo especular que “*no futuro será a estrada que comandará o automóvel*”; *ii)* na interdependência das macro variáveis, os dispositivos ITS-TMC são elevados a nortear o processo, incidindo sobre as outras e, claro, também sobre o projeto geométrico, à medida que são o elo de ligação mais próximo das demandas da sociedade e, finalmente, *iii)* a dinâmica da engenharia rodoviária, em diante, deverá ser concebida preferencialmente sob olhar sistêmico que enxergue a simbiose que se dá entre as partes envolvidas e compreenda o caráter holístico que retroalimenta um processo único e indivisível no qual “*o todo é maior que a simples soma das partes*”.

5 REFERENCIAS

AASHTO. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. 6ª ed. American Association of State Highways and Transportation Officials. Washington (D. C.). 2011.

ANTP – Agência Nacional de Transporte Público. Sistemas Inteligentes de Transportes. Série Cadernos Técnicos. Vol. 8. Brasília, mai. 2012.

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. BNDES *Setorial*, Rio de Janeiro, BNDES, n. 33, dez. 2010.

BENCKE, L. R.; PEREZ, L. F.; ARMENDARIS, O. C. Rodovias Inteligentes: uma visão geral sobre as tecnologias empregadas no Brasil e no mundo. Revista Brasileira de Sistemas de Informação. Santa Catarina, 2017.

CASTRO, B. H. R.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. BNDES *Setorial*, Rio de Janeiro, BNDES, n. 32, out. 2010.

CASTRO, N. D.; MOSZKOWICZ, M.; LIMA, A. O Novo Paradigma da Mobilidade Elétrica. GESEL Grupo de Estudos do Setor Elétrico UFRJ, 2018.

DIAS, B. C.; ANDRADE, R.; GUEDES, M. A. C. Comunicação Inter-Veicular e entre Veículos-Infraestrutura com o Estudo do Protocolo DSRC. Monografia de Conclusão de Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva do Centro Paulo Souza – Faculdade de Tecnologia – FATEC Santo André. 2010.

DNER. Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Brasília. 1999.

DNIT. Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Brasília. 2009.

- GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, v. VII, 2002.
- GOMES, L. B.; BOLZE, S. D. A.; BUENO, R. K.; CREPALDI, M. A. As origens do pensamento sistêmico: das partes para o todo. *Periodico Eletrônico em Psicologia*. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Pensando Famílias, vol. 18, n. 2. Porto Alegre, dez. 2014.
- MACEDO, E. L. Noções de Topografia para Projetos Rodoviários. Apostila do Curso, 2008.
- NETO, E.; RENTES, A. C.; ROMÃO, V.; SPRICIGO, V. Rodovias Inteligentes: Contextualização, simulação e adequação do projeto geométrico. Trabalho de Formatura em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.
- PEREIRA, D. M.; RATTON, E.; BLASI, G. F.; PEREIRA, M. A.; KÜSTER FILHO, W. Projeto Geométrico de Rodovias. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2010.
- PEREIRA, P. A. A.; PAIS, J. C.; FREITAS, E. F.; SILVA, H. M. D.; OLIVEIRA, J. R. M. A reabilitação da rede rodoviária no século XXI – A Contribuição da Inovação para uma Visão Global da Reabilitação Rodoviária. Universidade do Minho. Guimarães (Portugal), 2007.
- PERES, L. A. P. Veículos Elétricos: O limiar de uma era de transição. GRUVE UERJ, 2017.
- SILVA, A. P. Sistema infravia: integração em desenho urbano e redes de infraestrutura. Repositório Institucional da UFSC, p. 136.
- VASCONCELLOS, H. F. M. Modelo de Operação para Rodovias Inteligentes. Monografia (especialização). Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Curso de Especialização em Operações Rodoviárias. Florianópolis, 2017.
- VASCONCELLOS, M. J. E. Pensamento Sistêmico; O novo paradigma da ciência. 9ª ed, Campinas: Papirus, 2010.
- VILLANUEVA, L. E. C.; SILVA, A. J. Análise SWOT da implantação do Carro Elétrico sob a ótica da Construção Civil. *Revista UNIABEU*, V. 13, Número 33, Número Especial, Janeiro-Junho 2020.
- VAZ, L. F. H.; BARROS, D. CASTRO, B. H. R. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, BNDES, n. 41, dez. 2012.