



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

Jean Carlos Moreira

**UMA REVISÃO SOBRE O CONTROLE ELETRÔNICO DE ESTABILIDADE EM
VEÍCULOS AUTOMOTORES**

Monografia de Graduação

Ouro Preto, 2026

Jean Carlos Moreira

**UMA REVISÃO SOBRE O CONTROLE ELETRÔNICO DE ESTABILIDADE EM
VEÍCULOS AUTOMOTORES**

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Agnaldo José da Rocha Reis,
Dr.

Ouro Preto, 2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M838r Moreira, Jean Carlos.

Uma revisão sobre o controle eletrônico de estabilidade em veículos automotores. [manuscrito] / Jean Carlos Moreira. - 2026.
49 f.: il.: color., tab.. + Quadro.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Automação. 2. Veículos a motor - Estabilidade. 3. Acidentes - Prevenção. I. Reis, Agnaldo José da Rocha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.52:629.3

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jean Carlos Moreira

Uma Revisão sobre o Controle Eletrônico de Estabilidade em Veículos Automotores

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 03 de Março de 2026

Membros da banca

Doutor - Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Paulo Marcos de Barros Monteiro - Examinador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor - Danny Augusto Vieira Tonidandel - Examinador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Agnaldo José da Rocha Reis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Agnaldo Jose da Rocha Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/03/2026, às 12:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1069210** e o código CRC **13957C2E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter-me concedido o privilégio e a oportunidade da vida, ter dado-me a fé, a perseverança e a força para cada barreira ultrapassada e etapa conquistada. Sigo agradecendo a minha família por toda assistência e apoio em todos os aspectos da minha vida, sendo sinônimos de acolhimento, cumplicidade e união. Agradeço especialmente a meus pais e avós, o ensinamento de valores fundamentais para a minha criação e formação como ser humano. Agradeço também à Escola de Minas e a UFOP, pela oportunidade de fazer parte do quadro de alunos e obter grandes conhecimentos que foram capazes de agregar imensamente no meu desenvolvimento. Trago meu imenso agradecimento ao professor e orientador Agnaldo José da Rocha Reis, que me acolheu na Instituição desde o meu ingresso, dando-me oportunidades, instruções, orientações, conhecimentos, e também amizade.

“O automóvel é uma paixão que precisa de razão para ser segura.” (Autor Desconhecido)

RESUMO

O Programa Eletrônico de Estabilidade ou *Electronic Stability Program* (ESP) em inglês representa uma das mais importantes inovações no campo da segurança ativa veicular, destacando-se por sua capacidade de prevenir acidentes por meio da correção automática da trajetória em situações de instabilidade. O estudo é justificado pela crescente obrigatoriedade do ESP em diversos países, incluindo o Brasil, e pela necessidade de aprofundar a compreensão técnica e empírica sobre seu funcionamento, eficácia e limitações. A pesquisa realizada teve como objetivo principal analisar a contribuição do ESP na redução de acidentes e na promoção da segurança viária, especialmente em situações críticas como curvas acentuadas, desvios bruscos e superfícies de baixa aderência. Para isso, adotou-se uma metodologia composta por revisão bibliográfica e apresentação e análise dos resultados de estudos baseados em dados estatísticos oficiais, principalmente oriundos da *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA), comparando o comportamento dinâmico de veículos com e sem o sistema ESP. Os resultados publicados indicaram reduções expressivas nos índices de acidentes fatais, como uma queda de até 88% em capotamentos de *Sport Utility Vehicle* (SUVs), além de melhorias na previsibilidade e na estabilidade veicular. Também foram observados impactos positivos na redução de custos sociais, econômicos e hospitalares decorrentes de acidentes evitáveis.

Palavras-chaves: Programa Eletrônico de Estabilidade. Segurança Ativa. Estabilidade Veicular. Segurança Viária. Prevenção de Acidentes.

ABSTRACT

Electronic Stability Program (ESP) represents one of the most important innovations in the field of active vehicle safety, standing out for its ability to prevent accidents through automatic trajectory correction in unstable situations. The study presented here in the form of this Final Course Project is justified by the increasing mandatory use of ESP in several countries, including Brazil, and by the need to deepen the technical and empirical understanding of its operation, effectiveness, and limitations. The research aimed to analyze the contribution of ESP to accident reduction and the promotion of road safety, especially in critical situations such as sharp curves, sudden swerves, and low-grip surfaces. To this end, a methodology was adopted consisting of a literature review and the presentation and analysis of results from studies based on official statistical data, mainly from the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), comparing the dynamic behavior of vehicles with and without the ESP system. Published results indicated significant reductions in fatal accident rates, such as a decrease of up to 88% in Sport Utility Vehicle (SUV) rollovers, as well as improvements in vehicle predictability and stability. Positive impacts were also observed in reducing social, economic, and hospital costs resulting from preventable accidents.

Keywords: Electronic Stability Program, Active Safety, Vehicle Stability, Road Safety, Accident Prevention.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama funcional do princípio de operação do sistema ESC	27
Figura 2 - Sensores de Entrada utilizados pelo ESC	30
Figura 3 - Dispositivos de controle do ESC	31
Figura 4 - Comportamento do veículo sem ESC e com ESC	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação de desempenho dinâmico: com ESP x sem ESP

36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Reduções de acidentes com ESP segundo a NHTSA (2007–2017)

34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Anti-lock Braking System</i> (Sistema de Freios Antibloqueio)
ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems</i> (Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista)
ASR	<i>Anti-Slip Regulation</i> (Controle de Tração)
CAN	<i>Controller Area Network</i>
ECU	<i>Electronic Control Unit</i> (Unidade de Controle Eletrônico)
ESC	<i>Electronic Stability Control</i> (Controle Eletrônico de Estabilidade)
ESP	<i>Electronic Stability Program</i> (Programa Eletrônico de Estabilidade)
FMVSS	<i>Federal Motor Vehicle Safety Standards</i> (Padrões Federais de Segurança Veicular dos EUA)
LTV	<i>Light Trucks Vehicles</i> (Veículos Utilitários Leves)
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i> (Administração Nacional de Segurança de Trânsito dos EUA)
NCAP	<i>New Car Assessment Program</i> (Programa de Avaliação de Veículos Novos)
SUV	<i>Sport Utility Vehicle</i> (Veículo Utilitário Esportivo)
TCS	<i>Traction Control System</i> (Sistema de Controle de Tração)
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i> (Comunicação Veículo-Infraestrutura)
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i> (Comunicação Veículo-Veículo)
Yaw Rate	<i>Taxa de Guinada</i> (rotação do veículo em torno do seu eixo vertical)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Motivação	11
1.2 Objetivos	13
1.3 Organização do Texto	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Evolução dos sistemas de segurança ativa em veículos	14
2.2 Diferença entre segurança ativa e passiva	15
2.2.1 Segurança Ativa	16
2.2.2 Segurança Passiva	17
2.3 Introdução ao ESP	18
2.3.1 História do ESP	18
2.3.2 Obrigatoriedade legal em alguns países	19
2.3.3 Relevância na prevenção de acidentes	20
3 FUNCIONAMENTO DO ESP	22
3.1 Componentes Principais	22
3.1.1 Sensor de ângulo do volante	23
3.1.2 Sensor de aceleração lateral e de rotação (yaw rate)	23
3.1.3 Unidade de controle eletrônico	24
3.1.4 Atuadores (freio e acelerador)	25
3.2 Princípio de operação	26
3.2.1 Detecção da perda de estabilidade	27
3.2.2 Ação seletiva nos freios	28
3.2.3 Comunicação com outros sistemas (ABS e TCS)	29
4 ANÁLISE DE DADOS A PARTIR DE ESTUDOS CONDUZIDOS PELA NHTSA	32
4.1 Apresentação de dados sobre a redução de acidentes com o uso do ESP	32
4.2 Comparativo do comportamento dinâmico de veículos com e sem ESP	34
4.3 Análise qualitativa do impacto social e econômico	37
5 DISCUSSÃO	39
5.1 Interpretação de dados	39
5.2 Limitações do ESP	39
5.3 Problemas comuns com o Controle Eletrônico de Estabilidade	40
5.4 Futuro dos sistemas de estabilidade	41
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O avanço das tecnologias automotivas nas últimas décadas transformou profundamente os padrões de segurança veicular, culminando em sistemas cada vez mais sofisticados que atuam não apenas na proteção durante colisões, mas também na prevenção ativa de acidentes. Entre essas inovações, destaca-se o Programa Eletrônico de Estabilidade (ESP), um sistema projetado para monitorar continuamente a dinâmica veicular e intervir automaticamente em situações de perda de controle direcional. Sua relevância crescente se relaciona com a capacidade de reduzir significativamente a incidência de acidentes fatais e não fatais, particularmente aqueles decorrentes de derrapagens, saídas de pista e capotamentos.

A crescente incorporação do ESP em veículos ao redor do mundo tem evidenciado não apenas sua eficácia técnica, mas também seu impacto social e econômico. A obrigatoriedade de sua instalação em países como Estados Unidos, membros da União Europeia e, mais recentemente, o Brasil, atesta sua maturidade e consolidação como um elemento essencial na segurança viária moderna. Assim, compreender o funcionamento, os benefícios e os limites desse sistema é essencial para engenheiros, gestores públicos e motoristas que buscam aprimorar a mobilidade urbana com base em fundamentos técnicos e científicos.

O tema se justifica pela sua relevância contemporânea, tanto na indústria automotiva quanto nas políticas públicas de trânsito. A problemática que guia o estudo é: "De que forma o Controle Eletrônico de Estabilidade contribui para a redução de acidentes e o aumento da segurança veicular, especialmente em situações críticas de perda de controle?" A pergunta norteadora busca compreender a efetividade real do sistema em termos estatísticos, operacionais e sociais, à luz das evidências mais recentes e robustas disponíveis na literatura técnica e nos relatórios institucionais.

O trabalho também parte da constatação de que, apesar de sua eficácia comprovada, o ESP ainda enfrenta desafios de implementação em diversos contextos, especialmente nos países em desenvolvimento. Há uma lacuna entre a disponibilidade tecnológica e sua efetiva presença na frota circulante, o que compromete seu potencial de impacto. Portanto, propõe-se com este estudo explorar essa disparidade e contribuir com reflexões e dados que possam orientar decisões técnicas, regulatórias e mercadológicas no setor automotivo.

A metodologia empregada está dividida em duas abordagens complementares.

Primeiramente, realiza-se uma ampla revisão bibliográfica e técnica sobre os princípios de funcionamento, a história, a composição e a lógica operacional do ESP, com base em fontes de elevada credibilidade, como publicações da Bosch, relatórios da NHTSA, artigos acadêmicos e manuais técnicos de engenharia veicular. Essa fundamentação é essencial para construir o entendimento do sistema sob o ponto de vista da engenharia de controle e automação.

Em segundo lugar, adota-se no trabalho uma abordagem empírico-analítica por meio de análise de dados reais sobre a eficácia do ESP. São analisadas estatísticas oficiais que demonstram a redução de acidentes e fatalidades associadas à adoção do sistema, bem como o comportamento dinâmico de veículos com e sem o ESP em cenários de risco. Essa metodologia permite confrontar a teoria com a prática, evidenciando o impacto concreto do sistema na realidade viária.

A hipótese que sustenta a investigação é de que o ESP representa um divisor de águas na engenharia de segurança ativa veicular, sendo capaz de reduzir substancialmente os acidentes causados por perda de controle, inclusive em situações em que a habilidade do motorista seria insuficiente. Espera-se, portanto, mostrar que sua aplicação não apenas salva vidas, mas também reduz custos econômicos e sociais.

A relevância do tema reside, primeiramente, no contexto atual de mobilidade urbana e rodoviária, marcado por índices ainda elevados de acidentes, muitos dos quais poderiam ser evitados com o uso de tecnologias embarcadas. A crescente complexidade dos fluxos viários exige soluções automatizadas que compensam limitações humanas e operacionais. O ESP surge, nesse cenário, como uma resposta eficaz e comprovada para mitigar os riscos associados à perda de estabilidade veicular.

Em segundo lugar, o estudo é relevante por abordar uma tecnologia que transcende o caráter técnico, influenciando políticas públicas, regulamentações de segurança e decisões de mercado. O reconhecimento da eficácia do ESP por entidades como a *Global New Car Assessment Program* (NCAP) e a implementação de normas internacionais de obrigatoriedade reforçam sua centralidade no debate sobre inovação e democratização da segurança automotiva, especialmente em países com elevada taxa de sinistros rodoviários.

Justifica-se ainda o presente trabalho pela escassez de análises aprofundadas, no campo da engenharia de controle e automação, sobre a estrutura funcional e o desempenho do ESP em condições reais. Muito do que se divulga sobre o sistema permanece em nível

introdutório, ignorando aspectos técnicos avançados como sensores, algoritmos de controle e integração com outras plataformas veiculares.

Além disso, a escolha desse tema se justifica pela importância de disseminar o conhecimento técnico-científico sobre o ESP entre futuros engenheiros e profissionais da área, promovendo a qualificação crítica desses agentes diante de desafios práticos da engenharia automotiva. A compreensão do funcionamento do sistema, suas limitações e impactos pode contribuir para o desenvolvimento de soluções ainda mais eficientes e adaptadas à realidade brasileira.

1.2 Objetivos

Objetiva-se com este trabalho apresentar uma revisão sobre o controle eletrônico de estabilidade em veículos automotores, analisando-se sua eficácia técnica e funcional com ênfase em sua contribuição para a segurança viária.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- (i) descrever os princípios de funcionamento e os principais componentes do sistema;
- (ii) identificar os impactos da obrigatoriedade do ESP em diferentes países;
- (iii) avaliar os dados estatísticos sobre a redução de acidentes com uso do sistema;
- (iv) discutir suas limitações e perspectivas futuras;
- (v) apresentar uma análise técnico-social de sua importância para a engenharia e para a sociedade.

1.3 Organização do Texto

O restante deste trabalho está estruturado como se segue. O segundo capítulo traz a fundamentação teórica sobre os sistemas de segurança veicular, com foco na distinção entre segurança ativa e passiva e a evolução tecnológica do ESP. O funcionamento do sistema e seus componentes é assunto do terceiro capítulo. Já no quarto capítulo, apresenta-se a análise de um conjunto de dados coletados pela NHTSA. Alguns achados e suas limitações são discutidos no capítulo subsequente. Por fim, o sexto capítulo apresenta as considerações finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Evolução dos sistemas de segurança ativa em veículos

A segurança veicular tem sido uma preocupação constante desde os primórdios da indústria automobilística. Inicialmente, os esforços concentraram-se em sistemas de segurança passiva, como cintos de segurança e *airbags*, destinados a minimizar os danos aos ocupantes após a ocorrência de um acidente. No entanto, com o avanço da tecnologia e a crescente demanda por veículos mais seguros, emergiram os sistemas de segurança ativa, projetados para prevenir acidentes antes que eles ocorram.

Um dos marcos iniciais na segurança ativa foi o desenvolvimento do Sistema de Frenagem com Anti Bloqueio (*Anti Lock Braking System* (ABS)), que impede o travamento das rodas durante frenagens bruscas, mantendo a dirigibilidade do veículo. A Bosch introduziu o primeiro sistema ABS eletrônico em 1978, em parceria com a Mercedes-Benz, no modelo Classe S (Bosch, 2020).

Na década de 1980, a evolução continuou com o surgimento do Sistema de Controle de Tração (*Traction Control System* (TCS)), também conhecido como ASR (*Anti-Slip Regulation*). Esse sistema atua na prevenção da perda de tração das rodas motrizes, especialmente em superfícies escorregadias, ajustando automaticamente o torque do motor e aplicando força de frenagem nas rodas que estão patinando (Revista O Mecânico, 2020).

A integração e o aprimoramento desses sistemas culminaram no desenvolvimento do Programa Eletrônico de Estabilidade (*Electronic Stability Program* (ESP)), lançado comercialmente em 1995 pela Bosch e pela Daimler-Benz. O ESP combina as funcionalidades do ABS e do TCS, adicionando sensores que monitoram a dinâmica do veículo, como o ângulo de direção, a aceleração lateral e a taxa de guinada. Quando uma perda de estabilidade é detectada, o sistema intervém automaticamente, ajustando o torque do motor e aplicando força de frenagem individualmente às rodas, ajudando o motorista a manter o controle do veículo (Bosch, 2020).

A eficácia do ESP foi amplamente reconhecida após o incidente conhecido como "teste do alce" em 1997, quando um Mercedes-Benz Classe A capotou durante uma manobra de desvio em alta velocidade. O ocorrido levou a Mercedes-Benz a equipar todos os seus veículos com o ESP como item de série, influenciando outras montadoras a adotarem a tecnologia (Mercedes Magazine, 2020).

Desde então, o ESP tornou-se um componente essencial nos veículos modernos. Estudos indicam que o sistema pode reduzir em até 80% os acidentes causados por derrapagens (Calmon, 2020). Reconhecendo sua importância, diversos países implementaram legislações tornando o ESP obrigatório em veículos novos. No Brasil, a obrigatoriedade começou em 2020 para novos projetos e, a partir de 2022, deveria estender-se a todos os veículos leves comercializados no país (Quatro Rodas, 2020).

A evolução dos sistemas de segurança ativa reflete o compromisso contínuo da indústria automotiva em aprimorar a segurança dos veículos, utilizando tecnologias avançadas para prevenir acidentes e proteger os ocupantes.

2.2 Diferença entre segurança ativa e passiva

A segurança veicular pode ser dividida em duas categorias principais: segurança ativa e segurança passiva. A segurança ativa é composta por sistemas projetados para evitar a ocorrência de acidentes. Por outro lado, a segurança passiva visa minimizar os danos aos ocupantes de um veículo em situação de colisão. Em resumo, a segurança ativa previne, enquanto a segurança passiva visa minimizar danos maiores aos ocupantes.

A distinção entre segurança ativa e segurança passiva é fundamental para compreender o funcionamento dos sistemas de proteção veicular. Conforme Ferreira (2024), a segurança ativa atua preventivamente, buscando evitar que acidentes aconteçam por meio de tecnologias que monitoram e intervêm no comportamento do veículo antes da ocorrência do sinistro. Já os sistemas de segurança passiva têm como objetivo minimizar os danos quando o acidente é inevitável, protegendo os ocupantes a partir de estruturas físicas e dispositivos de retenção.

Enquanto a segurança ativa envolve mecanismos como controle eletrônico de estabilidade, frenagem autônoma de emergência, controle de tração e assistentes de permanência em faixa (Ferreira, 2024; Bosch, 2004), a segurança passiva engloba itens como airbags, cintos de segurança, zonas de deformação programada, apoios de cabeça e reforços estruturais. Assim, a diferença central reside no momento da atuação: a segurança ativa age antes do acidente, buscando impedir sua ocorrência, ao passo que a segurança passiva atua durante e após o impacto, reduzindo lesões e preservando vidas.

Além disso, conforme enfatizado por Ferreira (2024), políticas públicas modernas tendem a priorizar a expansão dos sistemas de segurança ativa, já que sua eficácia preventiva contribui diretamente para a queda dos índices de sinistralidade. Entretanto, ambos os tipos de segurança são complementares e indispensáveis para garantir a integridade dos ocupantes e

melhorar os resultados gerais de proteção veicular. Por fim, é importante ressaltar que tais mecanismos não isentam o motorista de conduzir o veículo com o máximo de atenção e sempre respeitando as leis de trânsito.

2.2.1 Segurança Ativa

Como dito anteriormente, na segurança ativa estão presentes tecnologias que auxiliam na prevenção de acidentes, mantendo o controle e a estabilidade do veículo em diversas condições de condução. Esses sistemas atuam antes de qualquer impacto, proporcionando ao condutor meios para evitar situações de risco.

Nesse sentido, Nojimoto e Iwano (2015) reforçam que os sistemas de controle de estabilidade têm ganhado destaque frente aos altos índices de acidentes. Para os autores, um sistema eficiente exige operação em malha fechada, estimativa precisa da velocidade de guinada, monitoramento do esterçamento do volante e controle individual de frenagem em cada roda. Essas características asseguram precisão e confiabilidade, além de demandarem rigorosa calibração e validação.

Ainda segundo Nojimoto e Iwano (2015), dentre as arquiteturas analisadas, a frenagem diferencial se destaca pelo menor custo e maior aplicabilidade prática. Sensores como acelerômetros, giroscópios e sensores de pressão coletam informações dinâmicas do veículo e permitem intervenções imediatas com base na comparação entre comportamento esperado e comportamento real. A complexidade desses sistemas exige profundo conhecimento de dinâmica veicular e extensos testes experimentais.

Por outro lado, Ferreira (2024) destaca a necessidade de ampliar a adoção de sistemas de segurança ativa nos veículos comercializados no Brasil. Apesar da resistência das montadoras, dados evidenciam que a presença dessas tecnologias reduz acidentes e minimiza seus efeitos. Ele defende que programas de incentivos fiscais, como o Rota 2030, deveriam exigir a incorporação desses sistemas como contrapartida, pois representam impacto direto na redução de fatalidades e na mitigação dos custos sociais e econômicos dos acidentes.

Em consonância com essa perspectiva, o programa Rota 2030 salienta que a evolução da segurança veicular é um dos pilares estratégicos da política industrial automotiva brasileira, ao estabelecer requisitos obrigatórios relacionados ao desempenho estrutural e às tecnologias assistivas em veículos produzidos e comercializados no país. O programa foi criado como um plano a longo prazo desenhado a fim de reduzir o atraso tecnológico

nacional, a partir de incentivos na implementação gradual de sistemas avançados de segurança ativa, promovendo maior confiabilidade nos veículos mediante as demandas globais do setor automotivo (BRASIL, 2020). Dessa forma, a integração de sistemas ativos passa a representar metas governamentais alinhadas ao desenvolvimento e inovação, reforçando a necessidade de políticas públicas que estimulem a ampla adoção na frota nacional.

2.2.2 Segurança Passiva

A segurança passiva possui elementos do veículo que têm como objetivo proteger os ocupantes durante e após uma colisão, minimizando lesões e danos físicos. Esses sistemas entram em ação quando o acidente ocorre, absorvendo e dissipando a energia do impacto.

Entre os principais elementos de segurança passiva estão os airbags, cintos de segurança, zonas de deformação programada, apoios de cabeça, reforços estruturais e colunas de direção colapsáveis.

Enquanto autores como Ferreira (2024) concentram suas discussões na segurança ativa, é possível compreender a relevância da segurança passiva ao analisar o papel complementar que desempenha. Mesmo com tecnologias sofisticadas de prevenção, situações imprevisíveis podem levar ao acidente, tornando fundamental a existência de dispositivos capazes de reduzir danos físicos. Assim, a segurança passiva constitui a última barreira de proteção entre o impacto e os ocupantes.

A atuação desses sistemas depende de processos físicos e mecânicos que absorvem energia, distribuem forças pelo corpo dos passageiros e evitam que impactos diretos ocorram em áreas vitais. A zona de deformação programada, por exemplo, é projetada para se amassar de maneira controlada, reduzindo a transferência de energia ao habitáculo. Os airbags, por sua vez, inflam-se em milissegundos para amortecer o corpo do ocupante, enquanto os cintos de segurança limitam deslocamentos bruscos.

Embora a literatura citada (Ferreira, 2024; Bosch, 2004; Nojimoto e Iwano, 2015) trate predominantemente de segurança ativa, estudos recentes demonstram que a integração entre os sistemas ativos e passivos representam aumento essencial para a segurança veicular, pois permite mitigar as lesões mesmo quando a colisão se torna inevitável (HUANG; HUANG, 2025). Nesse sentido, a segurança passiva complementa a ativa ao assegurar que, mesmo quando a tecnologia não puder evitar o sinistro, os danos sejam reduzidos ao mínimo possível, garantindo maior sobrevivência e menor gravidade das lesões.

2.3 Introdução ao ESP

2.3.1 História do ESP

O Programa Eletrônico de Estabilidade (ESP) ou Controle Eletrônico de Estabilidade (ESC), foi desenvolvido pela Bosch em parceria com a Daimler-Benz, sendo introduzido comercialmente em 1995 no modelo Mercedes-Benz S 600 Coupé (DAIMLER, 2020). O sistema surgiu como uma evolução dos freios antibloqueio (ABS) e do controle de tração (TCS), com o objetivo de aprimorar a estabilidade veicular em situações críticas de condução.

O ESP monitora constantemente parâmetros como velocidade, ângulo de direção e aceleração lateral, intervindo automaticamente ao detectar perda de controle, aplicando frenagem seletiva nas rodas e ajustando o torque do motor para manter a trajetória desejada. Desde sua introdução, o sistema tem sido aprimorado e adotado por diversas montadoras, tornando-se um componente essencial nos veículos modernos.

A evolução do Programa Eletrônico de Estabilidade (ESP) está diretamente ligada ao desenvolvimento progressivo dos sistemas de segurança veicular ao longo das últimas décadas. Nos primórdios da indústria automobilística, a segurança ocupava posição secundária diante das prioridades de desempenho e conforto. Somente a partir das décadas de 1970 e 1980, impulsionadas por pesquisas mais rigorosas e por exigências regulatórias crescentes, começaram a surgir dispositivos como cintos de segurança, airbags e zonas de deformação, que transformaram a percepção global sobre segurança automotiva (Santos e Amador, 2025).

O ESP surge como resultado dessa trajetória de aprimoramento tecnológico e representa uma das inovações mais significativas no campo da segurança ativa. Enquanto os primeiros sistemas buscavam apenas mitigar danos em caso de acidente, o ESP inaugurou uma nova categoria de dispositivos capazes de prevenir acidentes, intervindo diretamente na dinâmica do veículo em situações críticas de perda de aderência. O sistema integra sensores de velocidade, giroscópios, módulos de controle e atuadores que monitoram, em tempo real, a trajetória do automóvel e corrigem automaticamente desvios que possam levar à derrapagem ou à perda de controle (Lemos Junior; Batagini, 2024).

A consolidação internacional dessa tecnologia acompanha a maturidade dos sistemas eletrônicos automotivos. Países como Estados Unidos e membros da União Europeia tornaram obrigatória a utilização do ESP entre 2012 e 2014, após comprovada redução de até 35% nos acidentes relacionados à instabilidade veicular (Ferreira, 2024; Santos e Amador,

2025). No entanto, o Brasil teve uma adoção tardia. Embora os benefícios já fossem reconhecidos, fatores estruturais — como a lentidão na renovação da frota e a ausência de inspeção técnica obrigatória — retardaram sua implementação efetiva, que só ocorreu em 2024/2025, resultando em uma redução inicial estimada entre 8% e 12% dos acidentes (Ferreira, 2024).

A história do ESP também está associada ao desenvolvimento de arquiteturas eletrônicas mais robustas, como as redes automotivas baseadas em barramento CAN, essenciais para a comunicação entre sensores e módulos do sistema (Pereira et al., 2025). A incorporação de técnicas modernas de controle, como controladores fuzzy, Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs) e redes neurais aplicadas à estabilidade, ampliou a capacidade do ESP de prever instabilidades e responder com precisão a condições extremas de uso (Antoniassi; Oliveira, 2021; Banderchuk, 2023).

Além disso, com a integração a tecnologias como frenagem regenerativa, assistência de partida em aclive e mitigação de capotamento, o ESP se torna um componente central nos Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (*Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS)), contribuindo não apenas para a segurança, mas também para a eficiência energética e sustentabilidade dos veículos atuais (Pereira et al., 2025; Lemos Junior; Batagini, 2024).

Assim, a história do Controle Eletrônico de Estabilidade demonstra uma trajetória de evolução contínua, desde os primeiros instrumentos de segurança passiva até os atuais sistemas inteligentes embarcados. O ESP consolidou-se como marco tecnológico por sua capacidade de reduzir acidentes antes mesmo que aconteçam, integrando engenharia, sensores avançados, algoritmos de controle e políticas públicas. A experiência internacional e os primeiros resultados no Brasil reforçam seu papel indispensável no avanço da mobilidade segura e inteligente (Silva et al., 2021; Bueno, 2025).

2.3.2 Obrigatoriedade legal em alguns países

Reconhecendo a eficácia do ESP na prevenção de acidentes, diversos países implementaram legislações tornando sua instalação obrigatória em veículos novos.

- **União Europeia:** Desde novembro de 2014, todos os veículos de passageiros e comerciais leves novos deveriam ser equipados com ESP, conforme regulamentação da União Europeia.
- **Estados Unidos:** A National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)

determinou que, a partir de 2012, todos os veículos de passeio e SUVs novos vendidos nos EUA deveriam possuir ESP como equipamento padrão.

- **Brasil:** A obrigatoriedade do ESP no Brasil foi estabelecida pela Resolução nº 797 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), com implementação gradual a partir de 2020. Inicialmente prevista para ser concluída em 2022, a obrigatoriedade total foi adiada para 1º de janeiro de 2024, devido a solicitações da indústria automotiva.
- **Oceania:** A Austrália estabeleceu, em 2011, a obrigatoriedade do ESP para todos os veículos novos fabricados a partir de 2013. A Nova Zelândia seguiu um caminho semelhante, porém mais tardio. A exigência do ESP passou a valer para veículos novos a partir do ano de 2015, e estendendo a obrigatoriedade para veículos usados importados fabricados até 2020.

A tendência de adoção da obrigatoriedade também se observa em países emergentes, como Índia, Indonésia, México e China, onde legislações progressivas estão sendo implementadas (TRL, 2017). Segundo o *Global NCAP* (2023), a adoção obrigatória do ESP nos países do G20 tem potencial de evitar mais de 190 mil mortes e ferimentos graves até 2030, reforçando seu impacto positivo na segurança viária global.

2.3.3 Relevância na prevenção de acidentes

O Controle Eletrônico de Estabilidade (ESC) é amplamente reconhecido como uma das inovações mais eficazes em segurança veicular desde o advento do cinto de segurança. Sua principal função é evitar a perda de controle direcional em situações críticas, como curvas acentuadas, desvios bruscos e pavimentos de baixa aderência, atuando preventivamente antes que o condutor perca o domínio do veículo.

Diversos estudos comprovam sua eficácia. A *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) divulga que o ESC pode reduzir em até 49% os acidentes fatais envolvendo perda de controle em veículos de passeio e 59% em utilitários esportivos (SUVs) (NHTSA, 2011). Tais números demonstram o papel crucial do sistema na redução da letalidade dos acidentes.

De acordo com a Bosch (2024), uma das desenvolvedoras do ESP, o sistema já salvou mais de 15 mil vidas na Europa desde sua introdução, além de evitar centenas de milhares de acidentes. A empresa ressalta que o ESP age de forma inteligente ao comparar o

comportamento desejado do veículo (por meio do volante) com o movimento real, aplicando automaticamente os freios em uma ou mais rodas e ajustando o torque do motor para manter a estabilidade.

O *Automóvel Club de Portugal* (ACP) reforça que o ESP é especialmente eficaz em situações onde o condutor reage de forma inadequada ou em condições de baixo atrito, como em estradas molhadas ou cobertas de gelo. Em testes realizados por institutos europeus de segurança viária, veículos com ESP apresentaram taxas de derrapagem até 80% menores em comparação com modelos sem o sistema (ACP, 2023).

Além disso, um relatório da *Global NCAP* (2023) apontou que a obrigatoriedade do ESP em todos os veículos novos nos países do G20 poderia evitar mais de 190 mil mortes e ferimentos graves até 2030, consolidando-se como uma das tecnologias mais impactantes para a segurança viária global.

Portanto, o ESP não apenas contribui significativamente para a segurança ativa, como também atua diretamente na redução de custos com saúde pública, indenizações e perda de produtividade causadas por acidentes de trânsito evitáveis.

3 FUNCIONAMENTO DO ESP

3.1 Componentes Principais

O funcionamento do ESP depende de vários componentes que colaboram entre si para identificar e corrigir rapidamente os desvios de trajetória. Abaixo são destacados os principais componentes responsáveis pela atuação do sistema

O Controle Eletrônico de Estabilidade (ESC) depende de um conjunto de sensores, atuadores e módulos de processamento capazes de monitorar e corrigir, em tempo real, a trajetória do veículo. Conforme ressalta Lemos Junior e Batagini (2024), trata-se de um sistema que atua preventivamente, analisando dados contínuos sobre ângulo de direção, velocidade das rodas, aceleração lateral e taxa de guinada, integrando todos os sinais por meio da rede CAN. Esse conjunto de componentes permite que o sistema identifique, com elevada precisão, qualquer tendência de instabilidade, possibilitando correções imediatas antes mesmo que o condutor consiga reagir.

Essa integração de hardware e software também é destacada por Pereira et al. (2025), que explicam como arquiteturas modernas, como a CAN-ESP, tornam o sistema mais robusto ao distribuir a comunicação eletrônica entre diversos módulos. Microcontroladores automotivos de alto desempenho integrados a rede CAN e desenvolvidos sob normas de segurança funcional possibilitam maior velocidade no processamento de informações e ampliam a capacidade do veículo de se ajustar a diferentes cenários, inclusive em condições extremas de aderência. Assim, o ESP se torna um dos sistemas de segurança mais sensíveis e responsivos do veículo.

Outro ponto fundamental é a existência de sensores altamente precisos, responsáveis por captar qualquer alteração na dinâmica automotiva. Sem esses sensores, o sistema não teria como avaliar o comportamento real do veículo, muito menos compará-lo com a trajetória desejada pelo condutor. Dessa forma, os componentes do ESP compõem uma rede complexa, interdependente e essencial para a segurança ativa. Como reforçam Batagini (2024) e Santos e Amador (2025), é justamente essa sinergia entre sensores e algoritmos que permite ao ESP reduzir significativamente acidentes por derrapagem e perda de controle lateral.

Vale destacar que a evolução tecnológica dos componentes tornou o ESP mais acessível e confiável, ampliando sua presença na frota global. Países que adotaram o sistema mais cedo demonstram quedas expressivas nos índices de acidentes, validando o desempenho dos sensores, atuadores e módulos eletrônicos. Esse avanço também contribuiu para seu uso

em veículos populares, ampliando o impacto social da tecnologia e fortalecendo a importância de seus componentes na segurança viária contemporânea.

3.1.1 Sensor de ângulo do volante

O sensor de ângulo do volante é responsável por monitorar a direção desejada pelo motorista, ou seja, o ângulo de esterçamento do volante. Ele envia essa informação ao sistema de controle, que compara com a trajetória real do veículo. Quando há uma discrepância entre a direção indicada pelo motorista e a movimentação do veículo, o ESP entra em ação, corrigindo a trajetória (Bosch Global, 2024).

Como apontam Lemos Junior e Batagini (2024), esse sensor não apenas registra ângulos, mas também interpreta pequenas variações que podem indicar manobras evasivas ou movimentos não intencionais do volante. Dessa forma, ele contribui para a precisão do sistema ao fornecer dados contínuos e sensíveis ao comportamento humano. Sua capacidade de captar micro deslocamentos do volante torna o ESP capaz de reagir rapidamente a situações perigosas, muitas vezes sem que o motorista perceba.

Além disso, o sensor de ângulo do volante interage diretamente com os sensores de velocidade das rodas e de aceleração lateral. Essa comparação contínua entre intenção e execução é o que permite ao sistema identificar quando o veículo está se desviando do percurso planejado. Assim, o sensor deixa de ser apenas um coletor de dados e se torna elemento crítico para a lógica de decisão do ESP.

Sua evolução tecnológica permitiu maior durabilidade, precisão e integração com a eletrônica embarcada. Sensores modernos possuem redundância interna e resistência a vibrações, garantindo leitura consistente mesmo em situações desafiadoras. Isso reforça sua importância na arquitetura geral do sistema e valida seu papel como um dos pilares do ESP.

3.1.2 Sensor de aceleração lateral e de rotação (yaw rate)

Os sensores de aceleração lateral e de rotação são responsáveis por medir as forças que atuam sobre o veículo durante manobras, como curvas ou desvios repentinos. O sensor de aceleração lateral detecta a força centrífuga, que indica a tendência do veículo a derrapar para o lado. O sensor de rotação, também conhecido como giroscópio, detecta a rotação do veículo em torno do seu eixo vertical (yaw rate), identificando situações de sobresterço ou subesterço.

Essas informações são cruciais para a intervenção do ESP (ACP, 2023).

Ao medir a aceleração lateral, o sensor identifica a força exercida sobre o veículo durante curvas. Se a força excede os limites de aderência do pneu, o ESP interpreta como início de instabilidade. Já o sensor de yaw rate mede quanto o veículo está girando ao redor do eixo vertical, comparando esse valor com o ângulo de volante registrado. Se houver discrepância significativa entre o que o motorista direciona e o que o carro executa, o sistema identifica tendência de subesterço ou sobresterço (Antoniassi e Oliveira, 2021).

Esses sensores funcionam em conjunto com algoritmos sofisticados que interpretam padrões de movimento. Eles não apenas informam valores instantâneos, mas também detectam tendências, acelerando a resposta do sistema antes mesmo que a perda de estabilidade seja total. Essa capacidade preditiva é reforçada pelas abordagens de controle robusto e pela aplicação de modelos matemáticos apresentados por autores como Antoniassi e Oliveira (2021).

O papel dos sensores de aceleração lateral e yaw rate não se limita à observação do movimento; eles são a base para que o ESP compreenda o estado físico do veículo. Sua precisão afeta diretamente a eficiência das intervenções, tornando-os indispensáveis para qualquer estratégia de controle de estabilidade.

3.1.3 Unidade de controle eletrônico

A unidade de controle eletrônico (*Electronic Control Unit (ECU)*) é o cérebro do sistema ESP. Ela recebe informações de todos os sensores, processa esses dados e decide, em tempo real, qual intervenção é necessária para manter a estabilidade do veículo. A ECU pode acionar os freios e/ou controlar o torque do motor para corrigir a trajetória do veículo, de acordo com a análise feita a partir dos dados recebidos (NHTSA, 2011).

A ECU também executa algoritmos complexos baseados em modelos matemáticos de estabilidade veicular. Esses modelos comparam constantemente a trajetória ideal, determinada pelo ângulo do volante, com a trajetória real, derivada dos sensores de aceleração e yaw rate. Caso a diferença ultrapasse um limite seguro, a ECU aciona imediatamente os atuadores responsáveis pela correção (Trizólio, 2022). Essa capacidade de interpretar múltiplos sinais simultaneamente reflete a sofisticação tecnológica do sistema.

Além da função de análise e decisão, a ECU também pode registrar dados de

comportamento do veículo, facilitando diagnósticos e a manutenção preditiva. Estudos como os de Trizólio (2022) e Santos et al. (2022) mostram que a integração com sistemas inteligentes permite atualizações remotas e monitoramento contínuo, aumentando a confiabilidade do sistema e reduzindo a necessidade de intervenções mecânicas.

A evolução das ECUs tem sido marcada pela incorporação de técnicas avançadas de inteligência artificial e lógica fuzzy, permitindo que o ESP se torne cada vez mais adaptativo. Banderchuk (2023) destaca que abordagens híbridas fortalecem a capacidade do sistema de reagir a cenários complexos, ampliando a segurança e antecipando riscos de forma mais eficiente.

3.1.4 Atuadores (freio e acelerador)

Os atuadores de freio e o controle do acelerador são componentes essenciais na execução da correção da trajetória. O sistema de freios, integrado ao ABS, é capaz de aplicar frenagens seletivas em uma ou mais rodas para estabilizar o veículo. O atuador de acelerador, por sua vez, pode reduzir a potência do motor quando necessário, diminuindo a aceleração e ajudando a controlar a perda de aderência (GLOBAL NCAP, 2023).

Quando o sistema detecta instabilidade, os atuadores aplicam força de frenagem específica em uma roda ou reduzem a potência do motor para recuperar o controle. Essa intervenção precisa alterar o equilíbrio de forças no veículo, permitindo corrigir situações como sobresterço e subesterço (Pereira et al., 2025). A capacidade de atuar individualmente em cada roda diferencia o ESP de sistemas mais simples, como o ABS, que freia em ciclos, mas não controla a direção.

Outra característica relevante dos atuadores é a velocidade de resposta. Eles devem agir em milissegundos para evitar agravamento da instabilidade. Essa rapidez depende tanto da qualidade dos componentes quanto da eficiência do software da ECU. Por isso, fabricantes investem em sistemas hidráulicos e elétricos cada vez mais precisos.

Além disso, os atuadores também se beneficiam da integração com sistemas modernos de propulsão, como veículos híbridos e elétricos, nos quais a frenagem regenerativa pode auxiliar na estabilização. Pereira et al. (2025) destacam que essa integração amplia a eficiência e sustentabilidade do sistema, reforçando seu papel central na segurança ativa.

3.2 Princípio de operação

O funcionamento do ESP está baseado em uma série de princípios operacionais que permitem a detecção da perda de estabilidade e a ação corretiva do sistema

O princípio de operação do ESP se baseia na análise contínua da diferença entre o comportamento desejado e o comportamento real do veículo. Isso significa que o sistema monitora, a cada instante, se o carro está seguindo o curso indicado pelo motorista ou se está entrando em uma trajetória instável (Santos e Amador, 2025).

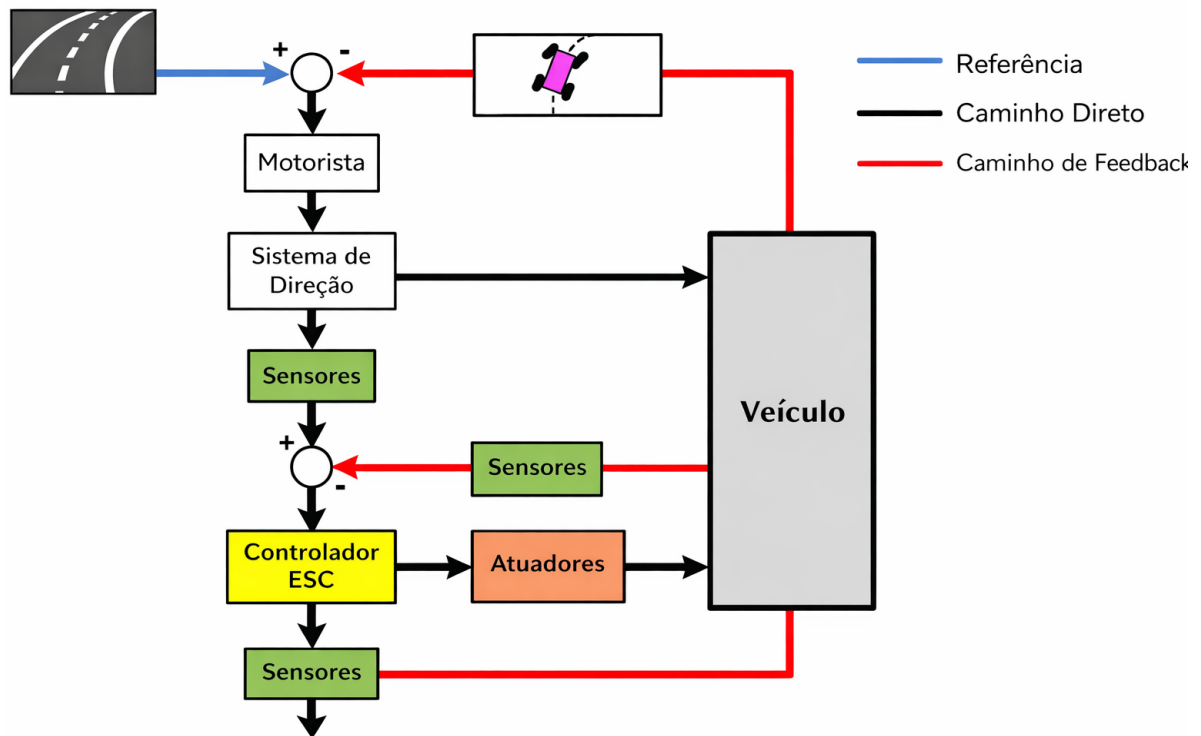
Esse processo exige uma sinergia perfeita entre sensores, unidades de controle e atuadores. Cada componente tem papel estratégico: os sensores detectam, a ECU interpreta e os atuadores executam as correções necessárias. É justamente essa integração que faz do ESP um dos sistemas mais eficazes para a prevenção de acidentes por derrapagem ou perda de aderência, como apontado por Santos e Amador (2025).

Outro aspecto importante é que o ESP opera de forma contínua e quase imperceptível ao condutor. A intervenção não depende da ação humana e, em muitos casos, é tão rápida e precisa que o motorista sequer percebe que o sistema corrigiu um desvio. Essa característica torna o ESP uma ferramenta essencial para reduzir riscos, especialmente em condições como pista molhada, curvas fechadas ou frenagens bruscas.

O princípio de operação é fortalecido pela evolução das tecnologias embarcadas. Algoritmos mais sofisticados, integração multiplataforma e comunicação de alta velocidade tornam as decisões do ESP cada vez mais precisas. Assim, o sistema amplia sua capacidade de antecipar riscos antes que eles se convertam em acidentes.

Como complemento ao princípio de operação descrito anteriormente, a **Figura 1** apresenta um fluxograma funcional que ilustra a lógica de controle em malha fechada do Controle Eletrônico de Estabilidade (ESC). No diagrama, a trajetória desejada pelo motorista é comparada continuamente com o comportamento real do veículo por meio dos sinais provenientes dos sensores, que são enviados ao controlador eletrônico responsável por interpretar as informações e determinar as correções necessárias. Quando identificada divergência entre a intenção do condutor e a dinâmica real do veículo, o sistema aciona os atuadores — principalmente os freios individuais — para restabelecer a estabilidade e manter a trajetória segura. Dessa forma, a figura traduzida reforça visualmente a integração entre motorista, sensores, unidade de controle e atuadores, evidenciando o funcionamento contínuo e automático do ESP.

Figura 1: Diagrama funcional do princípio de operação do sistema ESC.



Fonte: Adaptado de Clemson University (2024)

3.2.1 Detecção da perda de estabilidade

O primeiro passo para a operação do ESP é a detecção de uma possível perda de estabilidade do veículo. Isso ocorre quando os sensores percebem que o veículo não está seguindo a trajetória desejada. A detecção é feita rapidamente, antes que o motorista perceba a perda de controle (BOSCH GLOBAL, 2024).

Outro ponto relevante é que a detecção ocorre mesmo antes de a derrapagem ser evidente ao motorista. Como explicam Antoniassi e Oliveira (2021), o sistema trabalha com margens de tolerância extremamente pequenas e reage rapidamente a microalterações. Isso significa que o ESP atua de forma preventiva, impedindo que a instabilidade se desenvolva completamente.

A detecção depende fortemente da qualidade dos sensores, que devem fornecer dados precisos em tempo real. Por isso, sensores modernos são projetados com alta sensibilidade e capacidade de resistir a vibrações e variações climáticas. Essa robustez garante leitura confiável em diferentes contextos de uso.

Vale destacar que a detecção de instabilidade é resultado de modelos de avaliação complexos, muitas vezes envolvendo lógica fuzzy, LMIs e técnicas de controle robusto, conforme apresentado por Antoniassi e Oliveira (2021). Esse processamento matemático permite identificar padrões de risco com alto grau de precisão.

3.2.2 Ação seletiva nos freios

Uma vez detectada a perda de estabilidade, o sistema atua de maneira seletiva nos freios de uma ou mais rodas para corrigir a trajetória. Caso o veículo esteja subesterçante ou sobresterçante, o ESP aciona o freio nas rodas específicas para restaurar a estabilidade (NHTSA, 2011).

Uma vez detectada instabilidade, o ESP executa ações corretivas aplicando frenagem seletiva em uma ou mais rodas. Essa atuação individualizada cria momentos de correção que redirecionam o veículo para a trajetória adequada. Bueno (2025) destaca que essa é a característica mais importante do sistema, pois permite intervenções precisas e rápidas, mesmo em condições extremas.

O freio seletivo pode, por exemplo, corrigir um sobresterço aplicando força na roda dianteira externa. Em caso de substerço, o sistema freia uma roda traseira interna. Essa estratégia ajusta a distribuição de forças laterais, devolvendo ao veículo sua estabilidade natural. O motorista, muitas vezes, sequer percebe a intervenção, tamanha sua sutileza.

Além do freio, o ESP pode reduzir o torque do motor, auxiliando a restauração do controle. Essa atuação integrada entre frenagem e motor aumenta a eficiência do sistema e reduz o risco de derrapagem total. A ECU decide qual intervenção usar com base na gravidade do desvio e nas condições do veículo.

A habilidade dos atuadores em responder rapidamente é crucial para a eficácia da ação seletiva. Lemos Junior e Batagini (2024) reforçam que essa sincronização entre sensores, ECU e atuadores é o que diferencia o ESP de sistemas mais simples, conferindo-lhe status de tecnologia indispensável na segurança viária.

3.2.3 Comunicação com outros sistemas (ABS e TCS)

O ESP trabalha de forma integrada com outros sistemas de segurança do veículo, como o ABS e o TCS. O ABS impede o travamento das rodas durante a frenagem, enquanto o TCS controla a tração das rodas motrizes, evitando deslizamentos excessivos. A comunicação entre esses sistemas permite que o ESP faça intervenções mais precisas, sem comprometer o desempenho geral do veículo (ACP, 2023).

O ESP não opera isoladamente. Ele depende da comunicação contínua com outros sistemas de segurança ativa, especialmente o ABS (Sistema de Freios Antitravamento) e o TCS (Controle de Tração). Segundo Pereira et al. (2025), essa integração ocorre por meio da rede CAN, que permite troca de dados em alta velocidade entre todos os módulos eletrônicos do veículo.

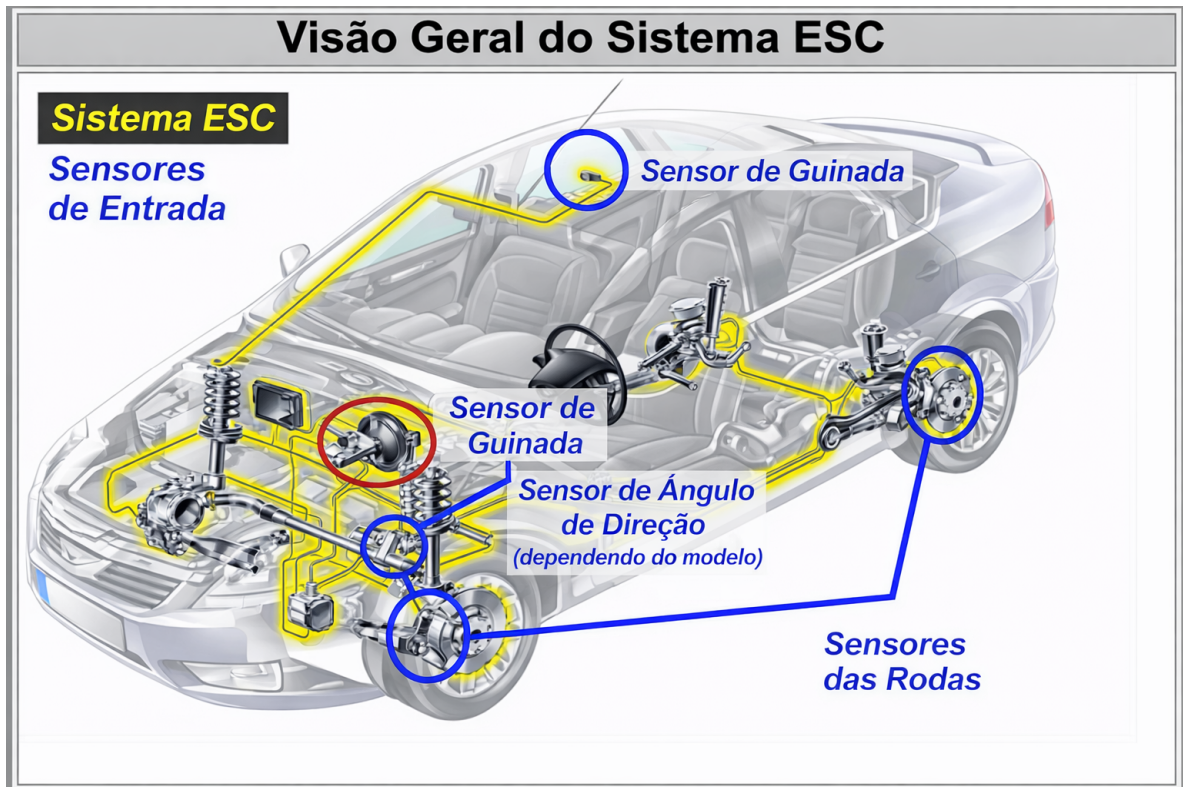
O ABS fornece ao ESP a capacidade de modular a frenagem sem travamento das rodas, essencial para que a intervenção seletiva funcione corretamente. Já o TCS regula o torque do motor, evitando que as rodas patinem durante aceleração ou manobras rápidas. Essa soma de capacidades amplia o leque de ações do ESP.

A interação entre ESP, ABS e TCS permite que o veículo responda de maneira coordenada a diferentes cenários de risco. Essa comunicação contínua cria um ambiente de segurança multissistêmico, no qual cada módulo contribui para manter o controle e a estabilidade do veículo.

Além disso, autores como Trizólio (2022) e Santos et al. (2022) destacam que a comunicação com sistemas inteligentes embarcados permite diagnósticos remotos e ajustes automáticos, aumentando a confiabilidade e a precisão do sistema. Essa integração torna o ESP parte fundamental do conjunto de tecnologias ADAS presentes nos veículos atuais.

A **Figura 2** apresenta os principais sensores utilizados pelo Controle Eletrônico de Estabilidade (ESC) para monitorar continuamente o comportamento do veículo. Entre eles estão o sensor de guinada, o sensor de ângulo de direção e os sensores de velocidade das rodas, responsáveis por informar ao módulo eletrônico qual trajetória o motorista pretende seguir e qual é o movimento real do veículo. Conforme descrito pela KYB, estes sensores permitem identificar rapidamente situações de subesterço ou sobresterço, fornecendo os dados necessários para que o sistema atue de forma preventiva e mantenha a estabilidade direcional (KYB, 2026).

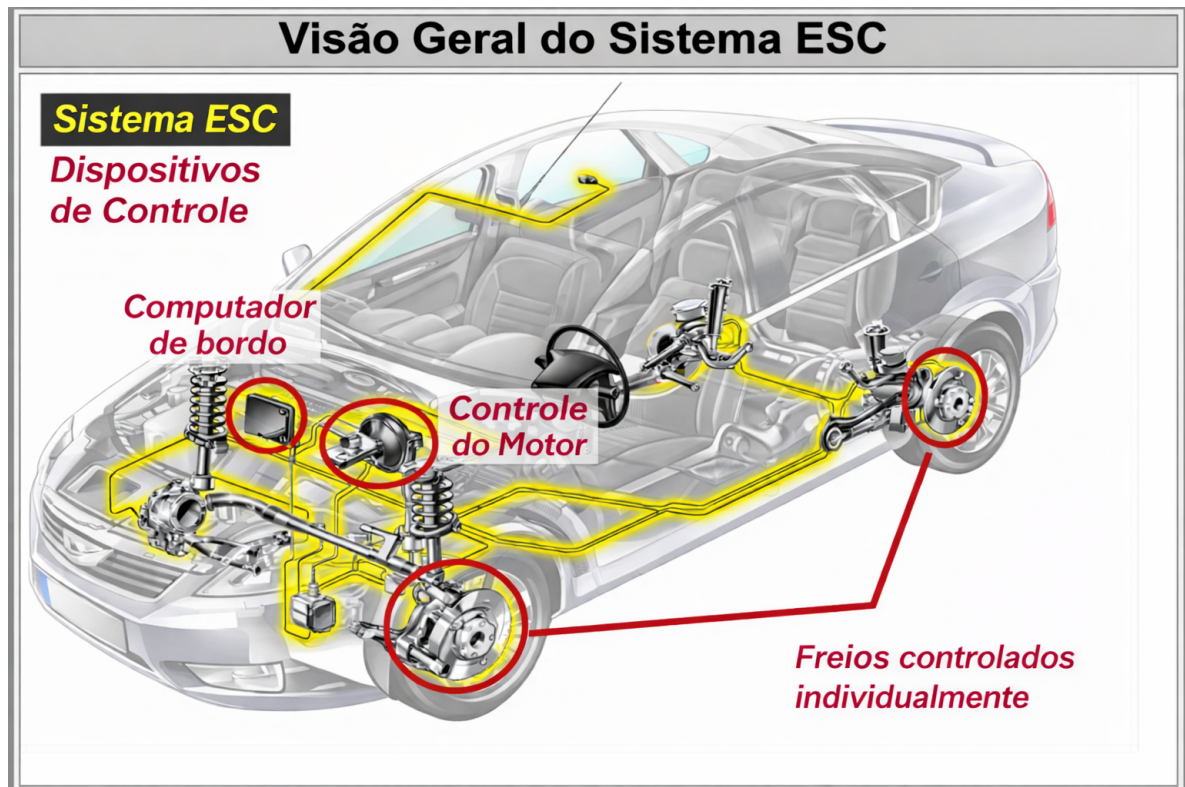
Figura 2 - Sensores de Entrada utilizados pelo ESC



Fonte: Adaptado de KYB (2026)

A **Figura 3** ilustra os principais dispositivos de atuação do ESC responsáveis por corrigir a trajetória do veículo após a análise das informações fornecidas pelos sensores. O sistema utiliza o computador de bordo, o controle do motor e a frenagem individual das rodas para reduzir a velocidade ou aplicar força de frenagem seletiva quando detecta perda de estabilidade. De acordo com a KYB, essa atuação automática ocorre em frações de segundo e tem como objetivo auxiliar o motorista a manter o controle do veículo durante manobras bruscas ou em condições de baixa aderência (KYB, 2026).

Figura 3: Dispositivos de controle do ESC



Fonte: Adaptado de KYB (2026)

4 ANÁLISE DE DADOS A PARTIR DE ESTUDOS CONDUZIDOS PELA NHTSA

A avaliação técnica de um sistema automotivo como o Controle de Estabilidade, não deve se restringir apenas à explicação teórica de sua operação para realmente entender como esse sistema afeta a segurança dos veículos e o trânsito em geral. Nesse sentido, é crucial analisar sua aplicação prática, sua eficácia validada por evidências reais e os resultados que surgem em diferentes situações e locais. Assim, neste capítulo apresentam-se alguns dos resultados de um estudo de caso que se baseou na coleta, sistematização e avaliação de dados confiáveis pertinentes ao ESP, concentrando-se em 3 aspectos principais: a eficácia em números, o desempenho dinâmico e a influência regulatória. Tais dados foram obtidos a partir do portal da NHTSA.

4.1 Apresentação de dados sobre a redução de acidentes com o uso do ESP

O relatório estatístico da NHTSA (2007) demonstrou que o Electronic Stability Program (ESP) produziu reduções expressivas em acidentes relacionados à perda de controle do veículo, especialmente em colisões de saída de pista, capotamentos e acidentes de um único veículo. Para veículos de passeio, a redução de acidentes fatais de saída de pista atingiu 36%, valor estatisticamente significativo conforme a tabela 1, reforçando a relevância desse sistema como elemento central da segurança ativa veicular. Essa redução decorreu da capacidade do ESP de identificar desvios entre o comando do volante e o comportamento real do veículo, intervindo automaticamente para recuperar a trajetória.

Nos veículos utilitários leves (LTVs/SUVs), o impacto do ESP é ainda mais expressivo. Estudos da NHTSA apresentaram reduções de 70% em acidentes fatais de saída de pista para essa categoria, resultado que se explica pela maior propensão desses veículos a apresentar cenários de instabilidade lateral devido ao centro de gravidade mais elevado. Esses dados evidenciam que o ESP é especialmente eficaz em frotas onde o risco estrutural do veículo é mais pronunciado, reforçando a importância de sua adoção universal.

A análise dos acidentes fatais por capotamento mostrou reduções ainda mais marcantes. Em veículos de passeio, o ESP reduziu 70% dos capotamentos fatais, enquanto nos LTVs essa redução chegou a 88%, representando a maior efetividade encontrada entre todos os tipos de acidente avaliados na pesquisa. Esses dados mostram que o ESP atua diretamente na eliminação do fenômeno de sobresterço e subesterço, condições precursoras da perda total de controle lateral.

Além das ocorrências fatais, o relatório apresentou reduções igualmente significativas em acidentes reportados pela polícia. Para veículos de passeio, a redução foi de 45% em acidentes de saída de pista e 64% em capotamentos não fatais. Para LTVs, os números chegaram a 72% e 85%, respectivamente. Esses resultados ampliam a compreensão de que o ESP não apenas previne fatalidades, mas também reduz substancialmente a incidência de acidentes que geram lesões e danos materiais.

A NHTSA também avaliou a redução de acidentes de um único veículo, excluindo colisões com pedestres ou animais. O ESP reduz esses acidentes em 36% para carros e 63% para LTVs, demonstrando consistência com os padrões de desempenho observados nos acidentes de saída de pista e capotamento. Esse dado confirma que o sistema é particularmente eficiente em situações em que o comportamento dinâmico do veículo depende exclusivamente da capacidade de correção automática do ESP.

Outro dado importante refere-se à redução de culpabilidade em colisões multi veiculares. Embora os efeitos sejam menores, eles ainda são relevantes: veículos de passeio apresentaram redução de 19% em acidentes fatais em que o condutor foi considerado culpado, enquanto LTVs apresentaram redução de 34%. Esses dados reforçam que o ESP também contribui para a mitigação de erros humanos que antecedem colisões envolvendo mais de um veículo.

No relatório de 2017, a NHTSA apresentou estimativas diretas de vidas salvas pelo ESP. Apenas em 2015, o sistema foi responsável por pelo menos 1.949 vidas salvas, sendo 857 em carros e 1.091 em LTVs. Ao longo do período entre 2011 e 2015, o total acumulado chegou a mais de 7.000 vidas salvas, mostrando que o benefício cresce conforme aumenta a proporção da frota equipada com o sistema.

A ligação entre a expansão da frota equipada com ESP e a redução contínua de fatalidades é confirmada nos gráficos das páginas iniciais do relatório de 2017, que demonstram que a partir de 2012, praticamente 100% dos veículos novos já saíram de fábrica com o sistema, impulsionando a queda no número de mortes por perda de controle. Dessa forma, os dados desse relatório consolidaram os achados estatísticos de 2007 e confirmaram que o ESP representa o maior avanço em segurança ativa desde a implementação do ABS.

Tabela 1 - Reduções de acidentes com ESP segundo a NHTSA (2007–2017)

Tipo de veículo	Tipo de acidente	Redução (%)	Fonte
Carros	Fatal – saída de pista	36%	NHTSA 2007
LTVs	Fatal – saída de pista	70%	NHTSA 2007
Carros	Fatal – capotamento	70%	NHTSA 2007
LTVs	Fatal – capotamento	88%	NHTSA 2007
Carros	Não fatal – saída de pista	45%	NHTSA 2007
LTVs	Não fatal – saída de pista	72%	NHTSA 2007
Todas categorias	Vidas salvas em 2015	1.949	NHTSA 2017

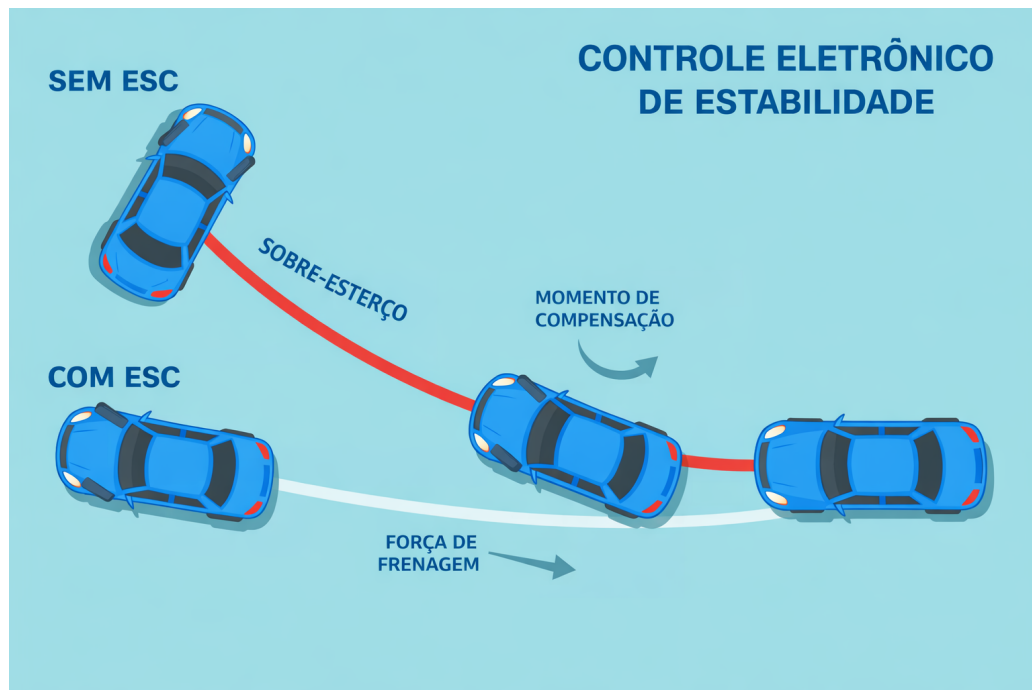
Fonte: NHTSA (2007–2017)

4.2 Comparativo do comportamento dinâmico de veículos com e sem ESP

A comparação entre veículos com e sem ESP revela diferenças fundamentais no comportamento dinâmico, especialmente em situações de emergência que envolvem manobras evasivas, curvas de alta velocidade ou superfícies de baixa aderência. O estudo de 2007 demonstrou que veículos sem ESP apresentaram maior propensão ao fenômeno de sobresterço, condição em que a traseira perde aderência e causa a rotação do veículo, levando-o a “rodar”. Já veículos equipados com ESP utilizam sensores de yaw rate e aceleração lateral para aplicar frenagem seletiva nas rodas internas ou externas e restaurar a trajetória, como demonstra a **Figura 4**.

Nos cenários de subesterço, em que o veículo segue reto apesar do comando de curva, o ESP intervém reduzindo o torque do motor e aplicando frenagem corretiva nas rodas dianteiras, aumentando a aderência e recuperando a dirigibilidade. Sem o ESP, essa condição frequentemente leva o veículo para fora da pista em curvas fechadas, sendo uma das principais causas dos acidentes de saída de pista registrados na base FARS estudada pela NHTSA (NHTSA, 2011).

Figura 4 - Comportamento do veículo sem ESC e com ESC.



Fonte: Adaptado de Hardesty (2025)

A diferença entre veículos equipados e não equipados também se manifesta na estabilidade longitudinal. Em veículos sem ESP, oscilações rápidas de direção podem gerar transferência abrupta de carga entre eixos, provocando instabilidade que culmina em capotamentos, especialmente em SUVs. Com o sistema ativo, o controle de estabilidade reduz essas oscilações por meio do acionamento microcontrolado dos freios, estabilizando o chassi e mantendo o centro de gravidade sob controle dinâmico (VAN ZANTEN, 2004).

O relatório aponta ainda que veículos com ESP apresentam comportamento previsível e padronizado em testes de manobras evasivas, enquanto veículos sem o sistema mostram grande variação entre motoristas, modelos e condições climáticas. Essa previsibilidade é fundamental para reduzir acidentes porque minimiza a dependência exclusiva da habilidade do condutor em momentos críticos.

Um dado que reforça essa diferença é a redução observada nas colisões multi veiculares em que o condutor do veículo equipado com ESP foi considerado culpado. Embora menor que nos acidentes de saída de pista, essa redução demonstra que o sistema contribui para evitar perda súbita de estabilidade durante frenagens fortes ou desvios rápidos, condições típicas de colisões transversais e traseiras.

O comportamento dos SUVs merece destaque, pois o relatório de 2007 mostrou que, comparativamente, os SUVs sem ESP têm probabilidade muito maior de capotamento devido ao centro de gravidade elevado. Os veículos com ESP, por sua vez, apresentam redução de até 88% em capotamentos fatais, evidenciando que o sistema compensa dinamicamente as limitações estruturais dessa categoria.

A comparação dinâmica também se estende ao impacto longitudinal após perda de controle. Em veículos sem ESP, a perda de trajetória frequentemente resulta em colisões com objetos fixos, aumentando significativamente a energia do impacto. Com o ESP, a intervenção precoce evita que o veículo deixe a pista, minimizando a violência do acidente e, conseqüentemente, a severidade das lesões.

O relatório de 2017 reforçou que a adoção universal do ESP padronizou o comportamento dinâmico dos veículos atuais, reduzindo drasticamente a variabilidade de resposta entre modelos e fabricantes. Isso se traduz diretamente em maior segurança, menor dependência da habilidade de motorista e aumento da probabilidade de recuperação em situações extremas.

Quadro 1 - Comparação de desempenho dinâmico: com ESP x sem ESP

Aspecto avaliado	Sem ESP	Com ESP	Fonte
Controle em curvas	Alto risco de sobre/subesterço	Correções automáticas de trajetória	NHTSA 2007
Risco de capotamento (SUVs)	Muito elevado	Redução de até 88%	NHTSA 2007
Resposta a manobras evasivas	Imprevisível	Estável e previsível	NHTSA 2007
Colisões multi veiculares culpadas	Frequentes	Redução de até 34%	NHTSA 2007
Recuperação de trajetória	Dependente do motorista	Automática e imediata	NHTSA 2007

Fonte: NHTSA (2007–2017)

4.3 Análise qualitativa do impacto social e econômico

O impacto social do ESP é profundo, especialmente ao analisarmos a redução de fatalidades apontada no relatório de 2017. Apenas em 2015, 1.949 vidas foram salvas, representando centenas de famílias poupadas de perdas irreparáveis. Essa redução de mortalidade afeta não apenas os indivíduos diretamente envolvidos em acidentes, mas toda a rede social e comunitária que sofre os efeitos emocionais, psicológicos e econômicos da perda.

Um segundo impacto social importante é a diminuição do número de vítimas com sequelas permanentes, já que a redução de acidentes graves (capotamento, saídas de pista e colisões de alta energia) implica menor incidência de lesões incapacitantes. A NHTSA mostra que o ESP reduz não apenas fatalidades, mas também acidentes reportados pela polícia, o que implica redução de internações, reabilitações prolongadas e afastamento laboral.

Do ponto de vista econômico, a redução de acidentes graves está diretamente relacionada à diminuição dos custos públicos e privados associados ao tratamento médico, resgates, processos judiciais e indenizações. Estudos como o da NHTSA (2007) evidenciam que os acidentes evitados pelo ESP estão entre os mais caros para o sistema de saúde, especialmente capotamentos e colisões com objetos fixos, que geram alto custo hospitalar e cirúrgico.

A implementação do ESP também tem impacto positivo no setor produtivo, pois reduz o número de trabalhadores afastados e a perda de produtividade associada a acidentes de trânsito. Cada acidente grave evitado representa potencial manutenção da força de trabalho, evitando defasagens em empresas e mitigando impactos nas famílias dependentes daquele trabalhador.

O relatório de 2017 deixou claro que a ascensão da frota equipada com ESP decorre da obrigatoriedade estabelecida pela norma federal FMVSS 126. Essa política pública evidencia que intervenções regulatórias podem gerar impactos sociais massivos, tornando as tecnologias avançadas acessíveis a toda população, e não apenas a consumidores de veículos de luxo, como ocorria em 1997.

Outro impacto econômico importante envolve o mercado de seguros. Veículos equipados com ESP apresentam menor probabilidade de sinistros graves, reduzindo custos para seguradoras e permitindo, em alguns mercados, tarifas mais competitivas para veículos equipados. Essa relação entre tecnologia e custo operacional reforça o papel essencial do ESP

como ativo econômico.

Além disso, o impacto social se estende à mobilidade urbana segura. A redução de acidentes contribui para menor congestionamento gerado por colisões, menor desgaste da infraestrutura de transporte e maior eficiência logística. Sistemas como o ESP cumprem função essencial no consumo coletivo de segurança e beneficiam inclusive aqueles que não possuem automóveis.

Ao consolidar-se como tecnologia universal, o ESP tornou-se um marco do avanço tecnológico com efeitos multiplicadores. A partir dele, surgiram outros sistemas avançados de assistência como controle de tração, mitigação de derrapagem e sistemas autônomos de frenagem, todos baseados na lógica de monitoramento e correção automatizada inaugurada pelo ESP. Portanto, o impacto econômico e social do sistema vai muito além das reduções mensuráveis: trata-se de um salto estrutural em segurança viária.

5 DISCUSSÃO

5.1 Interpretação de dados

Os dados analisados no capítulo anterior evidenciam de forma incontestável a eficácia do Controle Eletrônico de Estabilidade (ESP) como tecnologia de segurança ativa. As estatísticas fornecidas pela NHTSA (2007; 2017) revelam reduções consistentes em acidentes fatais e não fatais, especialmente aqueles decorrentes de perda de controle, como saídas de pista e capotamentos. No caso de SUVs, por exemplo, a redução de capotamentos fatais atingiu 88%, reforçando o papel do ESP na compensação de deficiências estruturais relacionadas ao centro de gravidade elevado desses veículos.

Outro dado relevante é a diminuição de acidentes de um único veículo em até 63% nos LTVs, o que demonstra a capacidade do sistema em intervir mesmo quando não há outros veículos envolvidos, atuando diretamente sobre o comportamento dinâmico do automóvel. O cruzamento entre os dados estatísticos e os princípios operacionais do ESP, como frenagem seletiva e redução de torque, permite concluir que sua atuação preventiva é eficiente ao antecipar e neutralizar instabilidades antes mesmo que sejam percebidas pelo condutor.

Além disso, o comportamento previsível e padronizado de veículos equipados com ESP em manobras evasivas, conforme apontado pela NHTSA (2007), representa uma redução significativa da variabilidade na resposta veicular, tornando o sistema um aliado direto da dirigibilidade segura. Tal padronização é crucial em situações críticas, nas quais a habilidade individual do motorista poderia não ser suficiente para evitar um acidente.

Portanto, os dados interpretados corroboram a hipótese de que o ESP é uma tecnologia fundamental não apenas para reduzir a letalidade no trânsito, mas também para promover estabilidade dinâmica, eficiência energética e padronização do comportamento veicular, especialmente em contextos urbanos e rodoviários de risco elevado.

5.2 Limitações do ESP

Apesar de sua reconhecida eficácia, o Controle Eletrônico de Estabilidade não está isento de limitações técnicas, operacionais e contextuais. Em primeiro lugar, o sistema depende diretamente da aderência disponível entre os pneus e o solo. Em superfícies extremamente escorregadias ou com atrito zero (como gelo espelhado ou óleo derramado), as intervenções do ESP podem ser insuficientes para manter a trajetória, já que não há atrito suficiente para que a frenagem seletiva produza os efeitos desejados.

Outro fator limitante está na qualidade e manutenção dos componentes do sistema. Pneus desgastados, sensores mal calibrados ou sistemas de freios com falhas comprometem significativamente a eficácia do ESP. Conforme destacado por Nojimoto e Iwano (2015), a precisão dos sensores de yaw rate e aceleração lateral é essencial para o desempenho do sistema, e qualquer variação pode gerar decisões equivocadas ou atrasadas por parte da ECU.

Além disso, a resposta do ESP é calibrada para condições médias de condução. Em situações extremas de carga (como veículos carregados além da capacidade) ou em cenários fora dos parâmetros definidos, o sistema pode não reagir com a mesma eficiência. Essa limitação é especialmente relevante em regiões com diversidade de condições topográficas e climáticas, como é o caso do Brasil.

Há ainda restrições relacionadas à infraestrutura viária. O ESP é projetado para operar com base em sinais físicos e dinâmicos, mas não possui, em sua configuração tradicional, integração com elementos do ambiente externo, como sinalização inteligente, condições climáticas em tempo real ou obstáculos não previstos. Isso limita seu potencial em comparação com sistemas mais recentes baseados em comunicação veículo-infraestrutura (V2I).

Vale destacar que o ESP não elimina completamente o risco de acidentes. Ele atua como um sistema de suporte à condução, mas ainda depende da conduta do motorista. Excesso de velocidade, distrações ou manobras deliberadas fora dos limites físicos do veículo podem ultrapassar a capacidade de correção do sistema. Portanto, embora o ESP represente um salto tecnológico, ele deve ser visto como uma ferramenta complementar, e não substitutiva, da responsabilidade e da formação adequada do condutor.

5.3 Problemas comuns com o Controle Eletrônico de Estabilidade

Os desafios frequentes associados ao Controle Eletrônico de Estabilidade (ESC), mesmo com o reconhecimento generalizado de sua eficiência em evitar derrapagens e proporcionar estabilidade ao veículo, podem afetar seu funcionamento quando ocorrem falhas em componentes relacionados. As falhas mais comuns incluem problemas no sistema de freio antibloqueio (ABS), como pastilhas de freio danificadas, além da presença de ar ou contaminação no fluido de freio, que prejudicam diretamente a capacidade de resposta do sistema (HARDESTY, 2025). Adicionalmente, pneus excessivamente desgastados ou em condições inadequadas diminuem significativamente a aderência ao solo, limitando a eficácia do ESC em situações de emergência (HARDESTY, 2025). Outro problema frequente é o mau

funcionamento do interruptor da luz de freio, que pode ativar indevidamente a luz do ESC no painel, sendo esta uma questão que pode ser facilmente resolvida com a substituição da peça (HARDESTY, 2025). Além disso, em situações de alta performance, as manobras do motorista podem não corresponder precisamente à trajetória desejada, resultando em intervenções não intencionais do sistema (HARDESTY, 2025). Portanto, a realização de manutenção preventiva e a inspeção regular dos componentes associados são essenciais para garantir o funcionamento eficaz do Controle Eletrônico de Estabilidade.

5.4 Futuro dos sistemas de estabilidade

A trajetória evolutiva do ESP aponta para uma integração cada vez mais ampla com os Sistemas Avançados de Assistência à Direção (ADAS) e com os veículos autônomos. O futuro dos sistemas de estabilidade veicular passa por três grandes eixos: (1) inteligência preditiva, (2) conectividade em tempo real e (3) integração com outras tecnologias embarcadas.

Em termos de inteligência preditiva, espera-se que os algoritmos de controle passem a utilizar inteligência artificial e aprendizado de máquina para identificar padrões de condução e prever instabilidades antes mesmo que elas se configurem. Como já demonstrado por Banderchuk (2023), técnicas de controle robusto combinadas com redes neurais têm o potencial de tornar os sistemas adaptativos ao comportamento do condutor e às condições variáveis do ambiente, oferecendo respostas personalizadas e mais rápidas.

No campo da conectividade, destaca-se a crescente aplicação da comunicação V2V (veículo-veículo) e V2I (veículo-infraestrutura), que permitirá ao sistema de estabilidade antecipar manobras de outros veículos, receber alertas de condições adversas e sincronizar intervenções com o fluxo de tráfego. Tal avanço amplia o escopo do ESP, que deixará de ser um sistema reativo e isolado, tornando-se parte de uma rede de mobilidade inteligente.

Outra tendência importante é a convergência entre o ESP e os sistemas de direção autônoma. Nestes casos, o controle de estabilidade passa a atuar como base de segurança para decisões tomadas por computadores, que controlam totalmente o movimento do veículo. A capacidade de monitorar e corrigir desvios de trajetória se torna ainda mais relevante em um cenário onde o “condutor” é um algoritmo. Além disso, o ESP poderá se beneficiar de sensores avançados, como LIDAR e câmeras de alta resolução, elevando ainda mais sua precisão.

É importante ressaltar que a aplicação do ESP em veículos elétricos e híbridos abre

novas possibilidades de integração com a frenagem regenerativa e sistemas de distribuição de torque por eixo, criando soluções de estabilidade mais eficientes e sustentáveis. Essa sinergia entre controle dinâmico e eficiência energética fortalece o papel do ESP como tecnologia-chave na mobilidade do futuro.

Assim, o futuro dos sistemas de estabilidade transcende a lógica de correção de trajetória, caminhando para um modelo preditivo, colaborativo e adaptativo, no qual a segurança será resultado da convergência entre sensores, algoritmos, conectividade e inteligência artificial embarcada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Controle Eletrônico de Estabilidade (ESP/ESC) representa uma das inovações mais impactantes na história da segurança veicular, destacando-se por sua capacidade de prevenir acidentes por meio da correção automática de desvios de trajetória. O ESP integra sensores, atuadores e algoritmos sofisticados capazes de monitorar em tempo real o comportamento dinâmico do veículo, identificando e corrigindo instabilidades mesmo antes que sejam percebidas pelo condutor.

A análise histórica e técnica permitiu compreender que o ESP evoluiu a partir de sistemas anteriores como o ABS e o TCS, ganhando protagonismo na segurança ativa. Essa evolução é resultado direto da crescente complexidade do trânsito moderno e da necessidade de sistemas preventivos que reduzam a dependência exclusiva da habilidade humana. A obrigatoriedade de sua instalação em diversos países, incluindo o Brasil, reforça a maturidade tecnológica e a eficácia comprovada do sistema.

A análise apresentada, fundamentada em dados da NHTSA e de outras entidades internacionais, evidenciou reduções expressivas nos índices de acidentes fatais e não fatais, sobretudo em saídas de pista e capotamentos. Em SUVs, por exemplo, observou-se uma queda de até 88% nos capotamentos fatais. Além disso, os veículos equipados com ESP demonstraram comportamento mais previsível, maior estabilidade e resposta padronizada em situações críticas, o que contribui para uma mobilidade mais segura e eficiente.

Contudo, apontou-se no trabalho algumas das limitações do ESP, especialmente em situações de baixa aderência extrema ou falhas nos componentes do sistema. Além disso, o ESP não substitui a conduta responsável do motorista, sendo uma ferramenta de apoio e não um substituto da direção consciente. Sua atuação é condicionada à manutenção adequada do veículo, às condições da via e ao comportamento do condutor.

Projeções futuras indicam um cenário promissor, no qual o ESP será integrado a sistemas de direção autônoma, inteligência artificial e comunicação em tempo real entre veículos e infraestrutura (V2I) e entre veículos e veículos (V2V). Essa convergência tecnológica amplia o papel do ESP, não apenas como sistema de segurança, mas como componente essencial da mobilidade inteligente e sustentável.

Portanto, pode-se concluir que o ESP é uma ferramenta imprescindível na engenharia automotiva contemporânea, reunindo avanços técnicos, impactos sociais positivos e

contribuições significativas para a redução de acidentes. Sua consolidação como item obrigatório em veículos novos é um marco na democratização da segurança veicular é um exemplo de como a tecnologia pode salvar vidas de forma silenciosa, eficiente e contínua.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACP – AUTOMÓVEL CLUB DE PORTUGAL. **Controle eletrônico de estabilidade: o que é e como funciona.** ACP, 2023. Disponível em: <https://www.acp.pt/o-meu-acp/automovel/detalhe/controlo-eletronico-de-estabilidade-o-que-e-e-como-funciona>. Acesso em: 21 março 2025.

ACP – AUTOMÓVEL CLUB DE PORTUGAL. **O que é e como funciona o ESP.** 2023. Disponível em: <https://www.acp.pt/o-que-e-o-esp>. Acesso em: 1 maio 2025.

ACP – AUTOMÓVEL CLUB DE PORTUGAL. **Tudo sobre o sistema ESP nos veículos.** 2023. Disponível em: <https://www.acp.pt/o-que-e-o-esp>. Acesso em: 20 abril 2025.

ANTONIASSI, André Silva; OLIVEIRA, Erick Denner de Araújo. **Bancada experimental de controle de tração.** Fatec Santo André, 2021.

BANDERCHUK, Ana Cláudia. **Teoria de Controle Robusto Combinada com Ferramentas de Aprendizado de Máquina para Sistemas Não-Lineares Incertos Sujeitos à Perturbações Persistentes.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

BOSCH GLOBAL. **Electronic Stability Program (ESP®).** 2024. Disponível em: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/safety/electronic-stability-program-esp/>. Acesso em: 3 maio 2025.

BOSCH GLOBAL. **Three decades of ESP electronic stability program from Bosch.** Bosch Global, 2025. Disponível em: <https://www.bosch.com/stories/25-years-electronic-stability-program-esp/>. Acesso em: 8 março 2025.

BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva.** Editora Edgard Blücher, 2004.

BOSCH. **Há 25 anos a Bosch apresentava o ESP®.** Bosch Media Service Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.bosch-press.com.br/pressportal/br/pt/press-release-32384.html>. Acesso em: 11 janeiro 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Rota 2030 –**

Mobilidade e Logística, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>. Acesso em: 18 fev. 2026.

BUENO, Tayssa Isadora Silva. **A mortalidade no trânsito e seus reflexos na saúde pública: o impacto dos fatores comportamentais, responsabilidade penal e a prevenção no sistema legal brasileiro sob a ótica da Lei nº 9.503/1997**. Goiânia: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2025.

CALMON, Fernando. **Controle Eletrônico de Estabilidade completa 25 anos de lançamento**. iCarros, 2020. Disponível em: <https://www.icarros.com.br/noticias/geral/control-eletronico-de-estabilidade-completa-25-anos-calmon/28239.html>. Acesso em: 11 janeiro 2025.

CLEMSON UNIVERSITY. Clemson Vehicular Electronics Laboratory. **Electronic Stability Control Systems**. Disponível em: https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/systems/stability_control.html. Acesso em: 19 fev. 2026.

DAIMLER AG. **Series production premiere of the Electronic Stability Program ESP® twenty-five years ago**. Automotive World, 2020. Disponível em: <https://www.automotiveworld.com/news-releases/daimler-series-production-premiere-of-the-electronic-stability-program-esp-twenty-five-years-ago/>. Acesso em: 10 fev. 2026.

DANG, Jennifer N. **Statistical Analysis of the Effectiveness of Electronic Stability Control (ESC) Systems – Final Report**. Washington, DC: U.S. Department of Transportation; National Highway Traffic Safety Administration, 2007. (DOT HS 810 794). Disponível em: *National Center for Statistics and Analysis (NHTSA)*.

FERREIRA, Paulo César Pêgas. **A introdução de novas tecnologias nos veículos e a redução da sinistralidade no trânsito**. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2024.

GLOBAL NCAP. **More than 190,000 deaths and serious injuries could be prevented by mandating ESC in all new cars in G20 countries**. 2023. Disponível em: <https://www.globalncap.org/news/new-report-finds-more-than-190000-deaths-and-serious-inj>

uries-could-be-prevented-by-mandating-electronic-stability-control-in-all-new-cars-in-g20-countries. Acesso em: 3 maio 2025.

HARDESTY, Chris. **Electronic Stability Control: Everything You Need to Know**. Kelley Blue Book, 2025. Disponível em: <https://www.kbb.com/car-advice/electronic-stability-control/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

HUANG, Jing; HUANG, Xinyu. **An integrated active-passive safety strategy for automobiles based on driver state recognition and injury risk prediction**. *Accident Analysis & Prevention*, 2025. DOI: 10.1016/j.aap.2025.108271.

IKEDA, Toshiaki. **Segurança Veicular: Dispositivos de Segurança Passiva – Descrição e Recomendações**. Instituto Mauá de Tecnologia, 2012. Disponível em: <https://maua.br/files/monografias/seguranca-veicular-dispositivos-de-seguranca-passiva-descricao-e-recomendacoes.pdf>. Acesso em: 9 fevereiro 2025.

KYB CORPORATION. **Electronic Stability Control (ESC)**. KYB Technical Information, 2026. Disponível em: <https://www.kyb.com/resources/technical-information/electronic-stability-control/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

LEMO JUNIOR, Eduardo; BATAGINI, Emerson. O uso do controle eletrônico de estabilidade no nosso cotidiano. **AEA – Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA 2024**, 2024.

MERCEDES MAGAZINE. **Controle Eletrônico de Estabilidade completa 25 anos de lançamento**. Mercedes Magazine, 2020. Disponível em: <https://www.mercedesmagazine.com.br/blog/controle-eletronico-de-estabilidade-completa-25-anos-de-lancamento/>. Acesso em: 12 janeiro 2025.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA). **Crash Prevention Effectiveness of Light-Vehicle Electronic Stability Control: An Update of the 2007 NHTSA Evaluation**. Washington, DC, 2011. Disponível em: <https://trid.trb.org/View/1120913>. Acesso em: 19 fev. 2026.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION – NHTSA. **Effectiveness of Electronic Stability Control (ESC) Systems**. Washington: NHTSA, 2011. Disponível em: <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/811486.pdf>. Acesso em: 4 maio 2025.

NHTSA. **Effectiveness of Electronic Stability Control (ESC) Systems**. National Highway Traffic Safety Administration, 2011. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/educacao/premio_de_natran/PremioCategoriaVIII2023.pdf. Acesso em: 21 março 2025.

NOJIMOTO, Diogo Kenji; IWANO, Willian Curi. **Análise de um sistema de controle de estabilidade veicular através do desenvolvimento de projeto**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

PEREIRA, Danilo Moura et al. CAN-ESP: Rede CAN de Baixo Custo para Veículos Elétricos. **Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Embarcados (SBSE)**, 2025.

QUATRO RODAS. Controle de estabilidade salva vidas: entenda como funciona o sistema ESP. **Quatro Rodas**, 2022. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/controle-de-estabilidade-salva-vidas/>. Acesso em: 8 março 2025.

QUATRO RODAS. **ESP completa 25 anos e logo estará em todos os carros brasileiros**. **Quatro Rodas**, 2020. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/esp-completa-25-anos-e-logo-estara-em-todos-os-carros-brasileiros>. Acesso em: 25 janeiro 2025.

REVISTA CARRO. Governo adia prazo para controle de estabilidade obrigatório. **Revista Carro**, 2021. Disponível em: <https://revistacarro.com.br/governo-adia-prazo-para-controle-de-estabilidade-obrigatorio/>. Acesso em: 8 março 2025.

REVISTA O MECÂNICO. A evolução do controle de estabilidade ABS, ASR e ESP. **Revista O Mecânico**, 2020. Disponível em: <https://omecanico.com.br/a-evolucao-do-controle-de-estabilidade-abs-asr-e-esp/>. Acesso em: 7 fevereiro 2025.

SANTOS, Barton Cutler dos; AMADOR, Nilson Roberto de Moraes. Análise do impacto dos radares de velocidade média na segurança rodoviária: o potencial benefício para o BPRV. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.11, n.1, p.01-14, 2025.

SANTOS, Lucas Henrique; SILVA, Eduardo Jorge da; SANTANA, Marinelson Pereira de; LOBATO, Elen Pereira; FONSECA, Wellington da Silva. Utilização dos protocolos ESP-NOW e MQTT para monitoramento e interação com sistemas industriais, **Sociedade Brasileira de Automática - IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE**, 2022.

SILVA, Juliano Ferreira da; NUNES, Rodolfo Vieira; SALES, George André Willrich; GONZALES, Alexandre. Potencial de reduções de acidentes de trânsito e impacto econômico através da implementação de itens de segurança automotivos. **Revista FATEC Zona Sul**, 2022.

TRIZÓLIO, Ana Beatriz Catarim. **Módulo didático IoT para automação residencial baseado no ESP8266 ESP-12**. Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022.

VAN ZANTEN, Anton. **Bosch Electronic Stability Program (ESP): system description and applications**. Warrendale: SAE International, 2004. SAE Technical Paper 2004-21-0060. DOI: 10.4271/2004-21-0060.

WEBB, Caitlin N. **Estimating Lives Saved by Electronic Stability Control, 2011–2015**. Traffic Safety Facts – Research Note. Washington, DC: U.S. Department of Transportation; National Highway Traffic Safety Administration, 2017. (DOT HS 812 391).