
SENSOR TRIDIMENSIONAL DE QUINTA RODA PARA MONITORAMENTO DA DINÂMICA VEICULAR EM CAMINHÕES ARTICULADOS

1. Contexto

Existe hoje na indústria brasileira de veículos pesados, uma preocupação por soluções que visem atender a resolução 641:2016 e 954:2022 do Contran [1 e 2], que tornou obrigatório sistemas de controle de estabilidade/antitombamento também para veículos articulados de carga, previsto para entrar em vigor a partir de 2025. Mesmo que muito pertinente a preocupação governamental em reduzir este tipo de acidentes com carretas, existe outra ocorrência frequente, que ainda carece de soluções tecnológicas para seu controle e em muitos casos, é a causa principal de um início de tombamento: O Efeito Chicote, ou “L” de Carreta.

2. Justificativa

Um grave acidente ocorrido em abril de 2019, entre uma carreta cegonha vazia e um ônibus de passageiros na serra de Santa Catarina foi causado devido ao escorregamento lateral do semirreboque (Efeito Chicote), em uma curva fechada com pista escorregadia, vindo a colidir com um ônibus que trafegava em pista contrária (Figura 1). Infelizmente, quatro pessoas vieram a óbito e 10 ficaram feridas neste acidente [3].

Figura 1 – Acidente causado por Efeito Chicote [3].



A justificativa é que mesmo com as resoluções [1 e 2] em vigor, este tipo de acidente não será evitado. Os atuais sistemas de controle de estabilidade, serão incapazes de detectar movimentos de este tipo de instabilidades lateral do semirreboque, principalmente em configurações de veículos brasileiras, como bitrens, rodotrens, que são mais longas e são mais pesadas que veículos articulados de outros países.

3. Metodologia

A empresa desenvolveu uma solução disruptiva para a medição do angular entre veículos articulados com apenas dois componentes: Um disco magnético de pino rei e um sensor magnético de quinta roda. Este sistema foi aplicado com sucesso em um produto comercial de automação dos espelhos retrovisores.

A tecnologia em questão, foi aprimorada juntamente com um Instituto de Pesquisa (ICT) para para a sua aplicação em sistemas de monitoramento de instabilidades dinâmicas do veículo.

4. Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar a tecnologia e a necessidade de se haver um sensor de monitoramento angular de quinta roda, principalmente no cenário brasileiro. Esta tecnologia, será capaz de monitorar os movimentos evitar eventos instabilidade como Efeito Chicote e tombamento, a partir de dados monitorados apenas na articulação do veículo.

5. Público alvo

Montadoras de caminhões, fabricantes de semirreboques e sistemistas atuantes no Brasil.

6. Revisão bibliográfica - instabilidades laterais

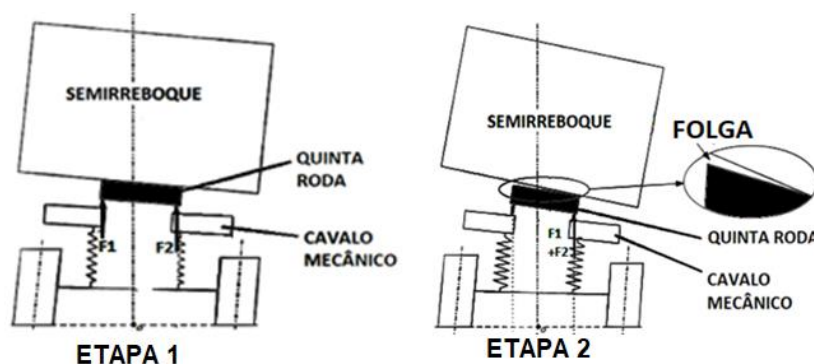
6.1 Acidentes ocorridos por instabilidades laterais em veículos articulados

Um estudo americano avaliou a causa de acidentes envolvendo instabilidades laterais em veículos articulados: Em 30,8% dos casos ocorreu Efeito Chicote do veículo e em 69,2% dos casos foi tombamento. Em 21% do total de casos de tombamento, o tombamento ocorreu a partir de uma instabilidade de um escorregamento lateral seguido pela rolagem do veículo [4].

6.2 Etapas do tombamento com monitoramento a partir da quinta roda

O tombamento de um veículo articulado ocorre quando a aceleração lateral excessiva leva o a rotação do semirreboque sobre seu ponto de contato como o solo. O processo de tombamento, visto a partir de uma verificação na Quinta Roda, ocorre em três etapas, conforme Figura 2:

Figura 2 – Etapas de tombamento na quinta roda (Etapa 1 e 2) [5].



ETAPA 1: O semirreboque está completamente apoiado na Quinta Roda e há uma rotação solidária entre veículos. ETAPA 2: Há transferência de carga para apenas um lado da Quinta Roda. Neste momento há a separação do semirreboque em relação a quinta roda, criando uma folga entre elas e tracionando o pino rei para cima. ETAPA 3: Tombamento eminente: A

aceleração lateral é superior ao limite de tombamento do veículo e o acidente não há mais como mais ser evitado [5].

6.3 A instabilidade do Efeito Chicote

O Efeito Chicote ocorre quando a força lateral sobre o veículo é maior que a força de atrito nas rodas, levando o semirreboque a escorregar lateralmente, este evento é mais comum de ocorrer com pista molhada (Figura 3). Veículos longos, vazios e biarticulados são mais propensos a este tipo de instabilidade, assim como o ocorrido em Santa Catarina (Figura 1).

Figura 3 – Efeito Chicote em pista escorregadia [7]



O Efeito Chicote também pode ser a causa de um tombamento subsequente. Quando há instabilidades combinadas, encontra-se uma condição muito difícil de controle, devido as necessidades conflitantes para correção simultânea [6]. A forma assertiva de se evitar o acidente é a detecção e a correção da instabilidade primária, neste caso é o Efeito Chicote [8].

7. Os sistemas de Controle de Estabilidades disponíveis no mercado brasileiro

7.1 O Sistema de Controle de Frenagem (EBS) e Anti-tombamento (RSC)

Para evitar o tombamento, a tecnologia evoluiu significativamente. O Sistema de Controle Eletrônico de Frenagem (EBS) conta com a funcionalidade de controle de tombamento do veículo (RSC). O EBS atua de forma ativa, verificando a velocidade e a aceleração lateral do veículo. Ao identificar tendências de tombamento, o sistema atua na frenagem do veículo de forma independente e automática [9].

7.2 O Sistema de Controle de Estabilidade Direcional (ESC)

Outro sistema controle de estabilidade disponível no mercado é o Controle Direcional (ESC). O ESC detecta situações onde há diferença entre a trajetória do cavalo mecânico e a desejada pelo motorista (escorregamento lateral). Ao detectar instabilidades, o sistema controla automaticamente a aceleração e frenagem do cavalo mecânico [9]. Todavia, o ESC controla exclusivamente a estabilidade direcional do cavalo mecânico e não de toda a composição.

A inexistência de uma solução para controlar os movimentos de guinada instáveis do semirreboque deve-se ao fato de não haver dados de sobre a posição relativa (ângulo) entre veículos da composição para permitir um efetivo controle.

7.3 A Efetividade dos sistemas de Controle de Estabilidade disponíveis no mercado

Deve-se reconhecer a importância para a segurança viária de veículos articulados que estas tecnologias atuais irão proporcionar. Todavia ainda há lacunas tecnológicas e espaço para aperfeiçoamento, principalmente para necessidades e peculiaridades do mercado brasileiro. Nos EUA um estudo realizado pelo departamento americano NHTSA [10], demonstrou qual será a real efetividade do RSC e ESC na prevenção de acidentes, conforme Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Efetividade das tecnologias RSC e ESC [10]

Tecnologia	Tipo Acidente	Efetividade (%)
RSC (Antitombamento)	Tombamento	37 - 53
	Guinada	3 - 3
	Combinados	21 - 30
ESC+RSC (Controle Direcional + Antitombamento)	Tombamento	40 - 56
	Guinada	14 - 14
	Combinados	28 - 36

A partir da tabela nota-se que o sistema de antitombamento (RSC) previsto de obrigatoriedade no Brasil, possui uma alta performance para efetivamente evitar eventos de tombamento. Todavia este sistema, se mostra ineficiente para o controle de instabilidades em guinada (Efeito Chicote), com apenas 3% de efetividade [10]. Todavia, o antitombamento (RSC) mesmo quando combinado com o ESC ainda apresenta uma baixa eficiência para eventos de guinada, visto que, este último sistema, apenas controle as instabilidades de guinada do cavalo mecânico e não de toda a composição.

7.4 Características específicas do mercado brasileiro ao controle de estabilidade

Com frota significativa e crescente no Brasil, veículos mais longos e biarticulados, estarão mais susceptíveis as instabilidades em guinada, devido maior amplificação traseira da última composição [11], figura 4.

Figura 4 – Efeito Chicote em biarticulados [11]



Em outro estudo, verificou-se as características dinâmicas de cada veículo de acordo com a legislação de seu país [12]. A configuração “Brazil”, nosso bitrem de 19,8m, que apresentou uma das piores condições de estabilidade veicular dentro do estudo: A maior amplificação traseira e um dos piores índices de amortecimento às instabilidades de guinada (Tabela 2).

Tabela 2 – Dinâmicas de veículos em cada país [12]

	AMPLIFICAÇÃO LATERAL	AMORTECIMENTO EM GUINADA
US	1.18	0.55
EU	1.29	0.50
Scandinavia	1.81	0.39
South Africa	1.56	0.22
Brazil	1.88	0.36

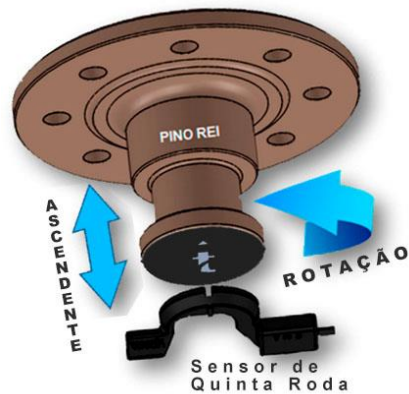
A questão dos biarticulados é tão significativa, que um fabricante do sistema de controle de estabilidade publicou a seguinte nota em seu manual: “O sistema EBS (...) é projetado e otimizado para caminhões tratores que rebocam uma única carreta. Se o caminhão trator equipado com EBS, é usado para tracionar combinações com múltiplos reboques (...) a eficácia do sistema EBS pode ser bastante reduzida.” [13].

8. Proposta: Aplicação de sensores de articulação de veículos articulados

As necessidades atuais de segurança e lacunas tecnológicas dos atuais sistemas de estabilidade, evidenciam a necessidade de um monitoramento mais efetivo para se evitar o Efeito Chicote. A proposta deste trabalho é o monitoramento das instabilidades a partir de um sensor de quinta roda (articulação do veículo), que apresente aplicação simples e precisão. Ademais, conforme apresentado, existe uma probabilidade significativa de os atuais sistemas de controle de estabilidade apresentarem uma eficiência reduzida em configurações veiculares tipicamente brasileiras, bitrens e rodotrens [13]. A variável fundamental para prevenção da instabilidade do Efeito Chicote é o ângulo da articulação, conhecendo o ângulo é possível verificar se o veículo está cumprindo a trajetória esperada, que para semirreboques é o cumprimento de uma rotação angular a partir do comando do cavalo mecânico [14].

Um disruptivo Sensor de Magnético de Quinta Roda (Figura 5) foi desenvolvido, preciso e de fácil aplicação mesmo em veículos em circulação. Este sensor é instalado na parte inferior da quinta roda (caminhão) e um disco magnético no pino rei (semirreboque). O disco magnético faz referência espacial para o sensor de quinta roda e, sem ter contato mecânico entre o sensor e pino, o sistema inovativo é capaz de mensurar com precisão todos os movimentos do pino rei quando engatado na Quinta Roda (rotações e translações).

Figura 5 – Sensor Magnético de Quinta Roda (autor)



O dado coletado mais importante é o ângulo entre veículos para detecção do Efeito Chicote. A tecnologia também é capaz também de monitorar movimentos de rotação da quinta roda e ascendentes do pino rei para detecção de tendências de tombamento em Etapa 2 via Quinta Roda (ver item 6.2). Com a aplicação deste sensor em sistemas de rastreamento, se tornará possível também monitorar condutas de motorista, como a popularmente conhecida como “Quebra de Asa” (Figura 6) e também, investigar acidentes de forma integral, a partir de dados coletados por este sensor.

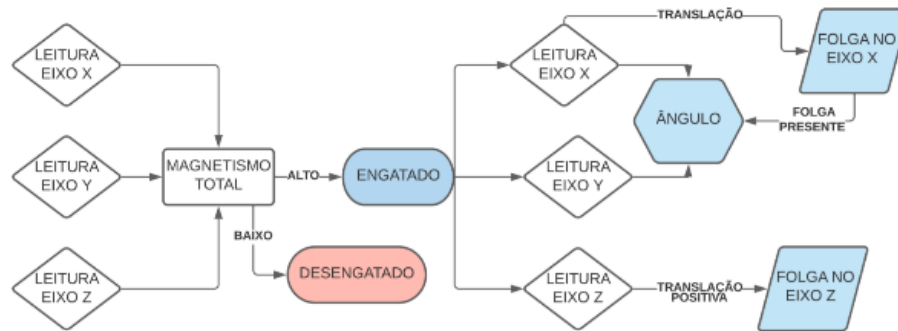
Figura 6 – Manobras agressivas, popularmente conhecida como “Quebra de Asa” [15]



9. Desenvolvimento

Este sensor foi desenvolvido a partir do aprimoramento de um sensor magnético de quinta roda já comercialmente disponível. O desenvolvimento baseou-se na calibração e adequação do novo sensor para mensurar o ângulo e translações do pino rei com precisão, criando assim um sensor tridimensional de quinta roda por variação magnética. O sistema foi desenvolvido entre 2019 e 2021 juntamente com uma instituição de pesquisa (ICT), o digrama de leitura do sistema utilizado para o desenvolvimento é apresentado abaixo:

Figura 7 – Diagrama de Desenvolvimento do Sensor Tridimensional de Quinta Roda [14]



10. Resultados

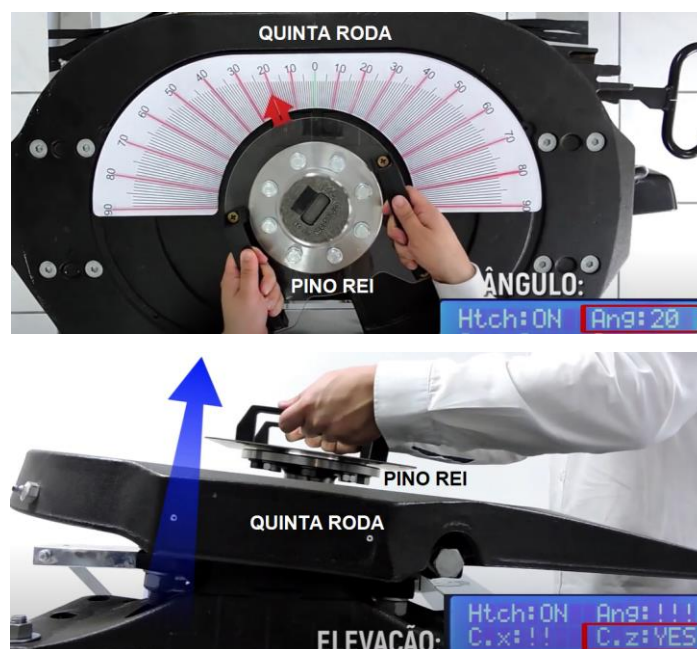
A validação dos resultados de prova de conceito deste sensor foi a sua aplicação em bancada e também em veículos. O teste prático consistiu em realizar conversões com os veículos para aferir o ângulo (tabela 3):

Tabela 3 – Resultados práticos de validação do Sensor Tridimensional de Quinta Roda [14]

VEICULO 1 – IVECO 2017						VEICULO 4 – MERCEDES 2019					
FOLGAS LIDAS		ERRO EM X	ÂNGULO		ERRO ANG.	FOLGAS LIDAS		ERRO EM X	ÂNGULO		ERRO ANG.
EIXO Z	EIXO X		REAL	SENSOR		EIXO Z	EIXO X		REAL	SENSOR	
0	0	0	15	14	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	32	28	4	0	0	0	7	7	0
0	0	0	40	35	5	1	0	0	16	18	2
0	0	0	-17	-15	2	1	0	0	30	31	1
1	0	0	-27	-24	3	1	0	0	45	40	5
1	0	0	-35	-32	3	0	0	0	-11	-14	3
1	0	0	-38	-35	3	1	0	0	-31	-33	2

Em bancada fidedigna, foram realizados testes de verificação do ângulo e de elevação do pino rei, que por questões de segurança, este último foi realizado apenas em bancada, figura 8.

Figura 8 – Validação do Sensor Tridimensional de Quinta Roda em bancada (autor)



11. Estratégia de Implementação e Cronograma de Execução

A estratégia de implementação proposta pelo autor é a apresentação desde sistema junto às montadoras e entidades públicas de segurança viária. A proposta estratégica é a união das informações coletadas por este sensor integradas aos atuais sistemas de controle de estabilidade, desta forma criando um sistema mais efetivo aos veículos brasileiros.

O transporte rodoviário de cargas do nosso país é essencial para nossa sociedade, portanto a redução do número de acidentes envolvendo este modal é vital para nosso país. O autor apresenta o seguinte cronograma estimado para execução da integração deste sistema com os atuais sistemas de controle de estabilidade, tabela 4:

Tabela 4 – Cronograma para a aplicação do Sensor de Quinta Roda integrado com EBS/ESC

Validação e adequação do Sensor em 1 articulação	90 dias									
Validação e adequação do Sensor em 2 articulações	180 dias									
Desenvolvimento do sistema integrado ao EBS e ESC				210 dias						
Validação do sistema integrado com EBS e ESC								120 dias		

12. Bibliografia

- [1] Contran - Resolução 641:2016; Brasília, 2016.
- [2] Contran – Resolução 954:2022; Brasília, 2022.
- [3] G1News; “Acidente ônibus e carreta deixa 10 feridos em SC”- <https://bitly.com/SiB8v>, 2019.
- [4] Kharrazi et al “*Analysis of heavy truck accidents with regard to yaw and roll instability*”, 2008.
- [5] Tomar, A. S., “*Estimation of Steady State Rollover Threshold for High-Capacity Transport Vehicles using RCV Calculation Method*” Chalmers Un., Sweden, 2018.
- [6] Dorion, et al. “*Feasibility of Anti-Jackknifing Systems for Tractor Semitrailers.*” London, 1989.
- [7] Truck Vision; “*Efeito Chicote*”; bit.ly/3ZVOqtu, 2019.
- [8] Zhou et. al “*Vehicle yaw stability control and its integration with roll stability control.*”, 2008.
- [9] Wabco; “*TEBS e ESC - Descrição dos sistemas Edição 7*”, 2017. / [10] NHTSA, “*Effectiveness of Stability Control Systems for Truck Tractors*”, EUA, 2011.
- [11] Islam et al. “*A Comparative Study of Multi-Trailer Articulated Heavy-Vehicle Models.*”, 2015.
- [12] Wideberg “*A comparative study of legislation and stability measures of heavy articulated vehicles in different regions*” Journal of Heavy Vehicle Systems, 2009.
- [13] Bendix “*The Bendix® ESP® EC-80™ Controller – Service Data SD-13-4986*” Ohio, 2015.
- [14] “*Estudo de Aplicabilidade e validação de um Sensor de Quinta roda para o Monitoramento da Dinâmica Veicular em Caminhões Articulados.* Lactec, Curitiba, 2021.
- [15] G1 News “*Caminhoneiros fazem manobras arriscadas*”; <https://glo.bo/3duCK7Z>, 2013.