



Desempenho dos Sistemas HS-WIM em Araranguá/SC em Testes com Veículos da Frota (II)

Agosto de 2024

Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT
Recurso de Desenvolvimento Tecnológico – RDT

Estudos e pesquisas aplicadas visando à modernização da fiscalização e à monitoração rodoviária com equipamentos de pesagem em alta velocidade utilizando o sítio de pesquisas instalado em Araranguá/SC

Desempenho dos Sistemas HS-WIM em Araranguá/SC em Testes com Veículos da Frota (II)

Agosto de 2024



Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT / Recurso de Desenvolvimento Tecnológico – RDT

Estudos e pesquisas aplicadas visando à modernização da fiscalização e à monitoração rodoviária com equipamentos de pesagem em alta velocidade utilizando o sítio de pesquisas instalado em Araranguá/SC

Concessionária Catarinense de Rodovias S.A. – CCR Via Costeira

Rua Silvio Burigo, nº 555 – Bairro Oficinas
CEP 88702-500 – Tubarão – Santa Catarina
<https://www.ccrviacosteira.com.br>

Breno Ferreira Leal
Gerente Contrato de Concessão

Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária – FAPEU

Rua Delfino Conti, s/nº, Campus Universitário, Bairro Trindade – Caixa Postal 5153
8040-370 – Florianópolis – Santa Catarina
<http://www.fapeu.com.br>

Valter Zanela Tani
Coordenador Técnico
Fábio Silva de Souza
Superintendente

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CCR	Concessionária Catarinense de Rodovias S.A.
COST	<i>European Cooperation in Science and Technology</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EI	Estação Integrada
FAPEU	Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária
HS-WIM	<i>High Speed Weigh-in-Motion</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LabTrans	Laboratório de Transportes e Logística
LAP	Leitura Automática de Placas Veiculares
OIML	<i>Organisation Internationale de Métrologie Légale</i>
PBT	Peso Bruto Total
PCBE	Pavimento de Concreto Betuminoso Espesso
PCCA	Pavimento de Concreto Continuamente Armado
PNCT	Plano Nacional de Contagem de Tráfego
PPV	Posto de Pesagem Veicular
RDT	Recurso de Desenvolvimento Tecnológico
SC	Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
WIM	<i>Weigh-in-Motion</i>

Lista de Figuras

Figura 1	Vista aérea do sítio de pesquisa de tecnologias HS-WIM em Araranguá/SC.....	13
Figura 2	Sítio de Pesquisa de HS-WIM de Araranguá/SC e seus componentes.....	14
Figura 3	Localização do PPV de Araranguá/SC.....	15
Figura 4	Exemplo do registro de dados coletados pelos sistemas comerciais	16
Figura 5	Classes selecionadas para a análise de dados do sistema HS-WIM.....	21
Figura 6	Distribuição dos erros por eixo e por grupo de eixo observados no sistema HS-WIM	23
Figura 7	Distribuição dos erros percentuais observados no sistema HS-WIM	24
Figura 8	Limites estabelecidos na recomendação OIML R 134-1 para o PBT	25
Figura 9	Limites estabelecidos na recomendação OIML R 134-1 para eixos e grupos de eixos.....	25
Figura 10	Limites do regulamento estabelecido pela Portaria Inmetro nº 019/2022 para o PBT.....	26
Figura 11	Limites do regulamento estabelecido pela Portaria INMETRO nº 019/2022 para eixos e grupos de eixos	26
Figura 12	Distribuição dos erros em função dos limites do INMETRO para o sistema HS-WIM	27
Figura 13	Dispersão de erros em função da velocidade para o sistema HS-WIM	28
Figura 14	Dispersão de erros em função do horário da coleta para o sistema HS-WIM.....	29
Figura 13	Número de registros do HS-WIM em cada classe do INMETRO	31

Lista de Quadros

Quadro 1	Dados coletados dos veículos da frota pelo Sistema HS-WIM.....	16
Quadro 2	Dados coletados dos veículos da frota pelo PPV	17
Quadro 3	Dados coletados dos veículos da frota pelo Sistema HS-WIM.....	28
Quadro 4	Resumo dos resultados obtidos no sistema HS-WIM	30
Quadro 5	Classes de desempenho atingidas pelo sistema HS-WIM.....	31

Sumário

1. Introdução	11
2. Sítio de Pesquisas de Pesagem em Movimento.....	13
3. Registro dos Dados	15
4. Análise de Desempenho do Sistema	19
4.1. Processamento dos dados	20
4.2. Erros observados nas amostras	21
4.3. Verificação de desempenho em função dos documentos de referência	24
4.3.1. Verificação estatística com a metodologia COST 323	27
4.4. Análise exploratória	28
5. Análise dos Resultados dos Sistemas	30
5.1. Discussão dos resultados	31
6. Considerações Finais	34
REFERÊNCIAS	36

1. Introdução

Nos últimos anos, têm ocorrido evoluções e modernizações relevantes nos sistemas de pesagem em movimento em alta velocidade, conhecidos como *High Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM), visando a automação da fiscalização de excesso de carga em rodovias. Esse avanço tem sido impulsionado por desenvolvimentos técnicos, metrológicos e legais que favorecem a utilização dos sistemas HS-WIM para fiscalização direta. Todavia, apesar do sistema HS-WIM se apresentar como uma ferramenta promissora, ainda existem alguns obstáculos a serem superados para que ocorra a implementação da fiscalização do excesso de carga apenas com base no modelo de pesagem em movimento em alta velocidade. Os principais desafios residem em questões como: a operação do processo de fiscalização; como orientar os condutores sobre o excesso de carga; quais os procedimentos administrativos devem ser adotados (transbordo e/ou remanejamento); como proceder após a identificação do excesso de carga; e como verificar se o problema foi corrigido.

Por outro lado, as tecnologias HS-WIM já estão prontas para a realização de coleta de dados necessários para embasar autuações por excesso de carga. No Brasil, empresas fabricantes e fornecedores estão trabalhando para a homologação dos equipamentos junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). O projeto em questão, de Recurso de Desenvolvimento Tecnológico (RDT), possui como objetivo principal o avanço das tecnologias de sensores e sistemas e dos aspectos da operação rodoviária, com foco na utilização dos sistemas HS-WIM.

O presente produto consiste na continuação do trabalho realizado na Ação 5 – “Coleta de dados, testes e avaliação de novas tecnologias de pesagem em movimento para políticas de fiscalização direta”, explorando os métodos de teste dos sistemas HS-WIM e como o desempenho desses sistemas é avaliado. Os testes de desempenho em sistemas HS-WIM são essenciais para garantir sua precisão, calibração e eficiência. Além disso, auxiliam na identificação de possíveis problemas e oportunidades de melhoria, contribuindo para o funcionamento adequado e confiável do sistema de pesagem ao longo do tempo. Acompanhar o desempenho dos sistemas de pesagem ao longo de sua vida útil traz uma série de benefícios importantes, incluindo segurança, cumprimento de regulamentações, eficiência operacional, manutenção preventiva e controle do excesso de carga.

Intitulado como “Desempenho dos Sistemas HS-WIM em Araranguá/SC em testes com veículos da frota (II)”, este documento representa a segunda fase de testes do Produto 7 e

tem como objetivo apresentar os resultados de desempenho dos sistemas de pesagem em movimento instalados no sítio de pesquisa, utilizando os veículos da frota, e implementando dados de referência do Posto de Pesagem Veicular (PPV) de Araranguá/SC. Monitorar o desempenho dos sistemas de pesagem em movimento permite assegurar que os veículos estejam dentro dos limites legais de peso estabelecidos, o que contribui para o aumento da segurança viária. Além disso, promove o cumprimento das regulamentações em relação ao peso máximo permitido para veículos de carga, evitando multas e sanções legais. A manutenção preventiva é facilitada ao identificar problemas nos sistemas de pesagem antes que se tornem falhas graves, evitando interrupções não planejadas das operações.

Os resultados obtidos são comparados com os erros máximos registrados pelos sistemas, com os limites para erro máximo admissível estabelecidos no Regulamento Técnico Metrológico da Portaria nº 19 do INMETRO, de 12 de janeiro de 2022 (Brasil, 2022), em vigência no país, com os limites da recomendação R 134-1 (OIML, 2006) da Organização Internacional de Metrologia Legal (*Organisation Internationale de Métrologie Légale*, OIML) e pelo procedimento estabelecido na especificação de referência COST 323 (COST Project, 1999).

Este documento apresenta uma organização que aborda os aspectos relacionados ao local de pesquisa de pesagem em movimento, o sistema adotado, os métodos de registro dos dados coletados e a análise de desempenho do sistema HS-WIM.

O Capítulo 1 consiste em uma breve introdução sobre o conteúdo do documento. Já o Capítulo 2 fornece informações sobre o sítio de pesquisas de pesagem em movimento, envolvendo a apresentação da infraestrutura especializada com diferentes tipos de pavimentos.

O Capítulo 3, por sua vez, fornece detalhes específicos sobre como os dados foram registrados para o sistema de pesagem em movimento e o sistema referencial de pesagem em baixa velocidade.

Em seguida, no Capítulo 4, é realizada a análise de desempenho dos sistemas, abordando diferentes aspectos e sendo definidos os pesos de referência para a análise, discutidos os erros observados nas amostras coletadas e realizada a verificação de desempenho em função dos documentos de referência.

O Capítulo 5, de forma sucinta, expõe uma análise geral e a discussão dos resultados. E por fim, no Capítulo 6, são prestadas as considerações finais.

2. Sítio de Pesquisas de Pesagem em Movimento

O sítio de pesquisa de pesagem em movimento, localizado no município de Araraguá/SC (Figura 1), tem destaque mundial pelo seu legado no desenvolvimento de tecnologias de pesagem em movimento. Ao longo dos anos, diversas parcerias foram firmadas entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), representada pelo Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e diversas empresas parceiras, tanto nacionais quanto internacionais. Essas parcerias contribuíram para a criação de uma infraestrutura especializada para pesquisa no local, a qual foi aproveitada para o desenvolvimento deste projeto.

Figura 1 – Vista aérea do sítio de pesquisa de tecnologias HS-WIM em Araraguá/SC



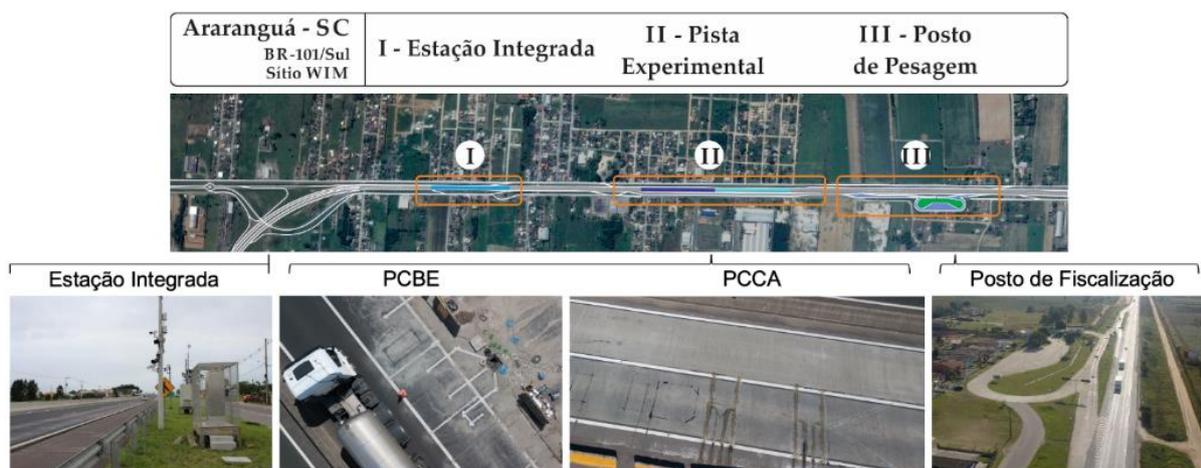
Fonte: FAPEU (2024)

Situado entre os quilômetros 415 e 418 da rodovia BR-101/SC (sentido sul), o sítio de pesquisa conta com vários equipamentos e sistemas *High Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM) instalados, tendo sido projetados e executados trechos de pavimento especialmente para o suporte desses sistemas. Neste contexto, foi implantada uma pista experimental composta por dois

trechos de pavimentação para HS-WIM: um trecho em Pavimento de Concreto Continuamente Armado (PCCA) – sendo o primeiro de seu tipo a ser implantado no Brasil em uma rodovia de alto fluxo – e um trecho em Pavimento de Concreto Betuminoso Espesso (PCBE). Ademais, o sítio de pesquisa também conta com uma Estação Integrada (EI), dotada de pavimentação betuminosa espessa adaptada para HS-WIM. Esses três segmentos se encontram instrumentados com sensores de diferentes tipos para a realização de pesquisas sobre a pesagem em movimento em alta velocidade.

A – Sítio de Pesquisa de HS-WIM de Araranguá/SC e seus componentes apresenta a localização da EI, da Pista Experimental (composta pelos trechos em PCBE e PCCA) e do Posto de Pesagem Veicular (PPV).

Figura 2 – Sítio de Pesquisa de HS-WIM de Araranguá/SC e seus componentes



Fonte: FAPEU (2024)

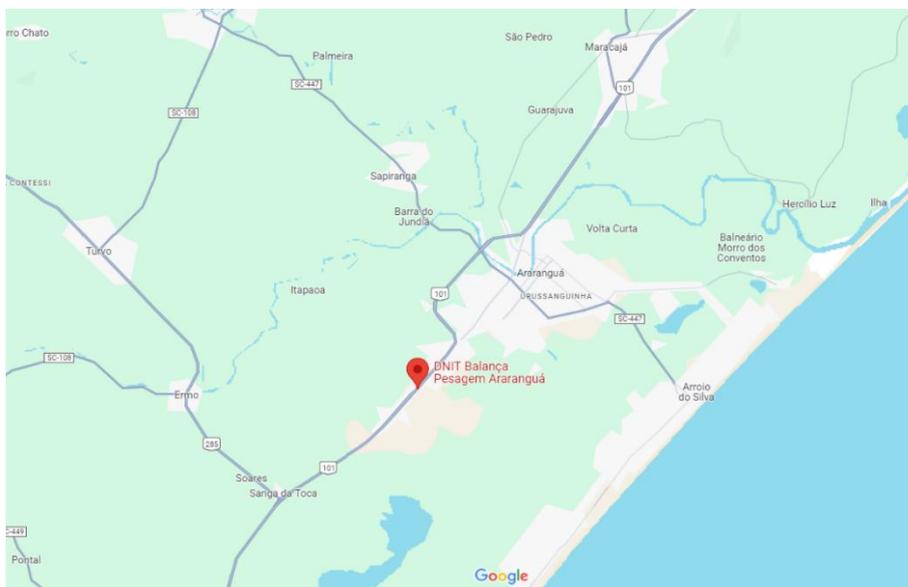
Neste produto, será abordado exclusivamente um sistema HS-WIM, sendo este o sistema mais recente instalado no sítio, bem como seu respectivo desempenho. O sistema de pesagem em movimento está alocado no trecho em PCBE do sítio de pesquisas e é composto por laço indutivo e sensores de pesagem. Mais detalhes sobre a infraestrutura do local de pesquisa são apresentados na Parte I deste produto.

3. Registro dos Dados

O sistema de pesagem em movimento deve viabilizar a fiscalização do peso de veículos de forma dinâmica e automatizada, coletando os dados necessários para a identificação do veículo. As informações que devem ser coletadas incluem dados como: placa de registro do veículo; o peso bruto total do veículo, bem como o peso por eixo ou peso por grupo de eixos; sua velocidade; e sua classificação, que implica no número de eixos, distância entre os mesmos e diferenciação de rodado duplo e simples.

Para validar a pesagem dos sistemas *High Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM) por meio das análises necessárias, requer-se a definição de pesos de referência dos veículos. Para a obtenção dos mesmos, foram considerados os valores coletados nas pesagens em baixa velocidade, realizadas no Posto de Pesagem Veicular (PPV) localizado no próprio sítio de pesquisas de Araranguá/SC, no quilômetro 418 da BR-101/SC (sentido sul). A – Localização mostra a localização do PPV.

Figura 3 – Localização do PPV de Araranguá/SC



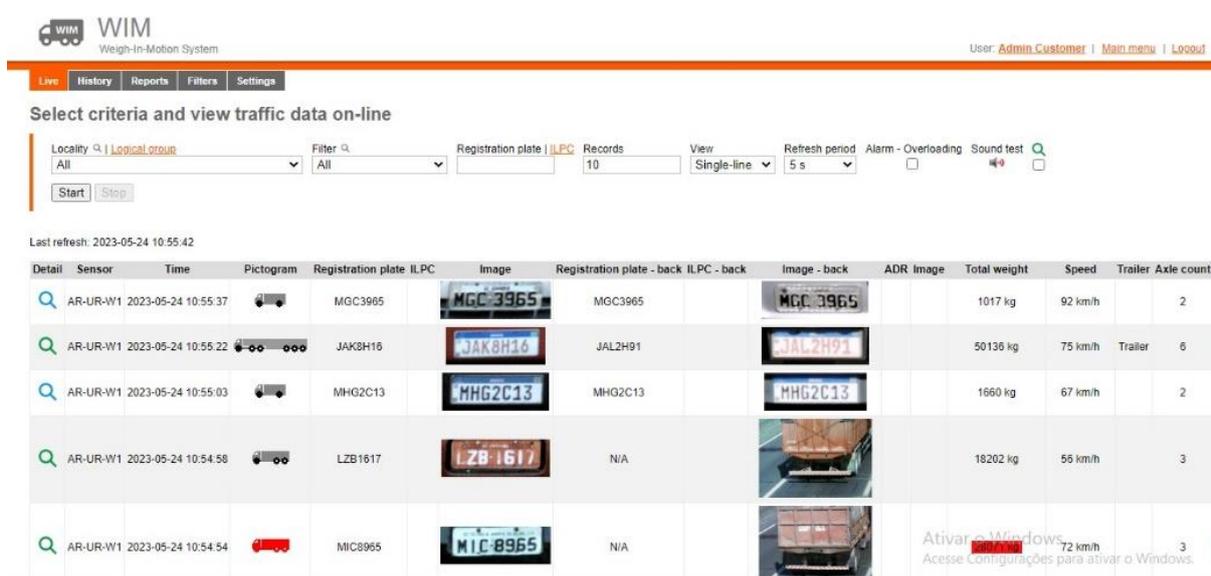
Fonte: FAPEU (2024)

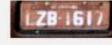
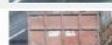
Este capítulo conta com a apresentação dos registros de pesagens referentes às informações de pesos e velocidade das passadas dos veículos da frota, coletados pelo sistema de pesagem

comercial e pelo PPV, no intervalo de 01 de maio a 20 de maio de 2024. Os dados foram colhidos 4 meses após a análise anterior, a fim de verificar a confiabilidade do sistema HS-WIM ao longo do tempo.

A Figura 4 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** exibe um exemplo do registro de dados dos veículos da frota coletados pelo sistema HS-WIM. Todos os veículos passantes sobre o sistema de pesagem são identificados e as informações coletadas são registradas no banco de dados interno do sistema. A identificação dos veículos passantes é feita pela placa veicular, por meio de câmeras de Leitura Automática de Placas Veiculares (LAP).

Figura 4 – Exemplo do registro de dados coletados pelos sistemas comerciais



Detail	Sensor	Time	Pictogram	Registration plate ILPC	Image	Registration plate - back ILPC - back	Image - back	ADR Image	Total weight	Speed	Trailer	Axle count
	AR-UR-W1	2023-05-24 10:55:37		MGC3965		MGC3965			1017 kg	92 km/h		2
	AR-UR-W1	2023-05-24 10:55:22		JAK8H16		JAL2H91			50136 kg	75 km/h	Trailer	6
	AR-UR-W1	2023-05-24 10:55:03		MHG2C13		MHG2C13			1660 kg	67 km/h		2
	AR-UR-W1	2023-05-24 10:54:58		LZB1617		N/A			18202 kg	56 km/h		3
	AR-UR-W1	2023-05-24 10:54:54		MIC8965		N/A			72 km/h			3

Fonte: FAPEU (2024)

O Quadro 1 apresenta os dados coletados com as seguintes informações: data e a hora de coleta, velocidade (em quilômetros por hora), Peso Bruto Total (PBT), peso por grupo de eixos (G1, G2 e G3) e peso por eixo (E1, E2, E3, E4, E5 e E6), com todos os pesos estando em quilogramas (Kg).

Quadro 1 – Dados coletados dos veículos da frota pelo Sistema HS-WIM

Data/hora	Vel.	PBT	G1	G2	G3	E1	E2	E3	E4	E5	E6
01/05/2024 00:26	69	24078	6002	16335	27433	6719	9496	7863	0	0	0
01/05/2024 00:30	56	25027	5989	14018	0	6898	10053	8076	0	0	0
01/05/2024 00:30	56	25027	5245	16908	0	6898	10053	8076	0	0	0
01/05/2024 00:37	60	49194	6027	15736	27131	6118	7555	6153	9673	9846	9849
01/05/2024 00:46	69	24447	5902	14594	27505	5667	10170	8610	0	0	0
01/05/2024 01:02	75	51895	5245	16908	0	6621	11368	7461	6649	8962	10834
01/05/2024 01:25	73	19965	6194	13626	26963	5421	8949	5595	0	0	0

Data/hora	Vel.	PBT	G1	G2	G3	E1	E2	E3	E4	E5	E6
01/05/2024 01:45	69	19362	5787	14733	28379	6257	7102	6003	0	0	0
01/05/2024 02:00	64	44280	6182	16055	24666	5078	9409	7924	11204	10665	0
01/05/2024 02:19	73	21793	6219	17961	23392	6404	8323	7066	0	0	0
01/05/2024 03:12	72	50667	4214	19400	0	6628	9658	7294	9221	9268	8598
01/05/2024 03:31	80	37537	5234	11564	0	5953	8649	6556	8899	7480	0
01/05/2024 05:13	69	23946	6625	16793	21806	4716	10108	9122	0	0	0
01/05/2024 11:38	65	20795	6035	15107	27186	7922	7331	5542	0	0	0
01/05/2024 11:41	80	51007	6625	16793	21806	6147	9871	6840	8046	10987	9116
01/05/2024 11:48	74	50065	6164	10790	15986	6101	9814	7891	9062	9548	7649
01/05/2024 11:50	53	51125	6164	10790	15986	5832	9717	7258	8926	10599	8793
01/05/2024 12:02	64	50018	4735	7688	0	6167	10228	8134	7169	8774	9546
01/05/2024 12:02	65	45674	6381	17330	23736	6304	7485	7077	7465	9099	8244
01/05/2024 12:03	61	49522	6098	17380	0	6007	9439	8977	7774	9300	8025
01/05/2024 12:12	68	24046	4966	18138	26609	6042	9872	8132	0	0	0
01/05/2024 12:24	60	49163	4966	18138	26609	5643	8170	8193	8666	10555	7936
01/05/2024 12:33	76	49052	5977	16252	24380	6141	10771	8706	6255	9627	7552
01/05/2024 12:35	56	51271	6170	5743	0	6537	9759	9114	8122	9036	8703
01/05/2024 12:42	63	22751	5004	18497	0	6759	7915	8077	0	0	0
01/05/2024 12:42	71	50714	4849	10297	0	6284	11381	8667	7381	8834	8167
01/05/2024 12:46	63	42382	4700	18087	0	6296	10210	8012	8659	9205	0
01/05/2024 12:49	56	47318	6853	17149	0	6026	6744	5967	9187	9751	9643
01/05/2024 12:49	67	49504	5053	8769	0	6005	10005	8545	8525	9132	7292
01/05/2024 12:52	74	20232	5413	13554	28917	6302	8378	5552	0	0	0
01/05/2024 13:00	55	49767	5641	16047	24272	6086	9635	8229	7812	9256	8749
01/05/2024 13:03	67	49139	6056	11411	25951	6089	8219	5729	9539	10814	8749
01/05/2024 13:05	61	22902	6534	15744	0	4291	10219	8392	0	0	0
01/05/2024 13:11	70	48745	6319	16496	26003	4661	9384	4947	8859	11303	9591
01/05/2024 13:11	63	49068	6308	17685	25438	5581	8011	5401	7795	12123	10157

Fonte: FAPEU (2024)

O Quadro 2 apresenta dados de peso bruto total e peso por grupos de eixos (G1, G2 e G3), de peso por eixos individuais (E1, E2, E3, E4, E5 e E6) e dados de cada passada (data e hora) pelo sistema Posto de Fiscalização da CCR para os veículos da frota local.

Quadro 2 – Dados coletados dos veículos da frota pelo PPV

Data/hora	PBT	G1	G2	G3	E1	E2	E3	E4	E5	E6
01/05/2024 00:28	23610	6590	17020	0	6590	9190	7830	0	0	0
01/05/2024 00:32	24490	6720	17770	0	6720	9670	8100	0	0	0

Data/hora	PBT	G1	G2	G3	E1	E2	E3	E4	E5	E6
01/05/2024 00:35	24430	6740	17690	0	6740	9690	8000	0	0	0
01/05/2024 00:41	49120	6130	13970	29020	6130	7510	6460	9540	9670	9810
01/05/2024 00:48	23680	5370	18310	0	5370	9900	8410	0	0	0
01/05/2024 01:04	50430	6670	18080	25680	6670	10090	7990	6550	9000	10130
01/05/2024 01:27	19790	5330	14460	0	5330	8410	6050	0	0	0
01/05/2024 01:47	19390	6060	13330	0	6060	6990	6340	0	0	0
01/05/2024 02:02	43070	4960	9300	28810	4960	9300	7400	10820	10590	0
01/05/2024 02:21	21280	6010	15270	0	6010	8510	6760	0	0	0
01/05/2024 03:14	50030	6540	16910	26580	6540	9510	7400	8440	8750	9390
01/05/2024 03:32	36430	5660	8320	22450	5660	8320	6530	8660	7260	0
01/05/2024 05:15	23110	4350	18760	0	4350	9580	9180	0	0	0
01/05/2024 11:40	20870	7800	13070	0	7800	7150	5920	0	0	0
01/05/2024 11:43	50130	5940	16630	27560	5940	9980	6650	8000	10740	8820
01/05/2024 11:50	47920	5910	17010	25000	5910	9510	7500	8370	9050	7580
01/05/2024 11:53	49490	5870	16510	27110	5870	9750	6760	8390	9920	8800
01/05/2024 12:03	48570	6010	17670	24890	6010	9910	7760	6970	8890	9030
01/05/2024 12:04	46560	6010	14680	25870	6010	7800	6880	7670	9500	8700
01/05/2024 12:05	48320	6100	17190	25030	6100	9150	8040	7460	9180	8390
01/05/2024 12:14	23370	5870	17500	0	5870	9380	8120	0	0	0
01/05/2024 12:26	47640	5390	15980	26270	5390	8500	7480	8330	10320	7620
01/05/2024 12:35	47260	5760	18720	22780	5760	10260	8460	6340	9210	7230
01/05/2024 12:37	50070	6210	18520	25340	6210	10130	8390	8230	8590	8520
01/05/2024 12:44	23160	6510	16650	0	6510	8880	7770	0	0	0
01/05/2024 12:44	48730	5980	19090	23660	5980	11000	8090	7010	8440	8210
01/05/2024 12:48	41230	5030	10180	26020	5030	10180	7530	8570	9920	0
01/05/2024 12:50	46700	5960	12000	28740	5960	6620	5380	9000	10060	9680
01/05/2024 12:51	48590	5590	17650	25350	5590	9730	7920	9310	9350	6690
01/05/2024 12:53	19990	6150	13840	0	6150	8170	5670	0	0	0
01/05/2024 13:01	47920	6070	17190	24660	6070	9510	7680	7680	8690	8290
01/05/2024 13:05	48990	6050	13840	29100	6050	8140	5700	8510	11280	9310
01/05/2024 13:06	22780	4470	18310	0	4470	9910	8400	0	0	0
01/05/2024 13:13	47980	4760	13780	29440	4760	8870	4910	8370	11240	9830
01/05/2024 13:13	46520	5240	13100	28180	5240	7750	5350	6900	11680	9600

Fonte: FAPEU (2024)

Os dados exibidos acima serão utilizados para a análise do desempenho do sistema HS-WIM, realizada no Capítulo 4, permitindo uma avaliação da eficiência do processo de pesagem.

4. Análise de Desempenho do Sistema

A análise do desempenho do sistema *High Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM) ocorre por meio da comparação dos pesos registrados pelo sistema comercial selecionado com os valores de referência dos veículos da frota. Esta etapa visa avaliar a capacidade do sistema instalado em estimar os pesos reais dos veículos passantes. O processo de análise começa pela determinação dos pesos de referência a serem empregados, processo que, por sua vez, é realizado com a compatibilização dos dados de veículos coletados pelo *High Speed Weigh-in-Motion* (HS-WIM) com os dados do Posto de Pesagem Veicular (PPV). Com os pesos de referências definidos, são calculados os erros percentuais para cada registro de pesagem apresentado pelo sistema HS-WIM. Para cada registro, são analisados: o erro na medição do Peso Bruto Total (PBT); o erro na medição dos pesos de cada grupo (que pode ser composto por um eixo isolado ou por um conjunto de eixos próximos); e o erro na medição dos pesos dos eixos individuais.

Após realizar os cálculos de erros dos registros de pesagem, inicia-se a etapa de análise de desempenho do sistema. Nessa etapa, é verificada a distribuição estatística dos valores de erro percentuais apresentados para cada tipo de medição (PBT, grupos de eixos, eixos isolados ou eixos individuais). A partir dessa composição, são aplicados os critérios para três metodologias de análise diferentes, baseadas em normas e recomendações nacionais e internacionais. Primeiramente, são comparados os erros máximos apresentados pelos sistemas ao erro máximo admissível estabelecido pelo Regulamento Técnico Metrológico, atualmente vigente no país na forma da Portaria nº 19, de 12 de janeiro de 2022 (Brasil, 2022), do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Os erros máximos também são comparados com os limites da recomendação R 134-1 (OIML, 2006), da Organização Internacional de Metrologia Legal (*Organisation Internationale de Métrologie Légale*, OIML). Além da verificação dos erros máximos, também se aplica o procedimento estabelecido na especificação COST 323 (COST Project, 1999), documento internacional de referência elaborado para embasar a criação de normativas para a avaliação de desempenho de sistemas HS-WIM. O procedimento da COST 323 não consiste apenas na comparação dos erros máximos, mas na aplicação de um tratamento estatístico da amostra de erros coletados para verificar o nível de confiança estatístico dos resultados apresentados pelo sistema.

A medição dos pesos dos eixos individuais que compõem grupos de eixos é realizada com propósitos de pesquisa e exploração, uma vez que a carga é aplicada pelos eixos de forma

individual, quando o veículo se encontra em movimento e sujeito às ações dinâmicas, mistura-se e distribui-se entre os eixos do grupo, tornando mais complexa a divisão de peso entre cada eixo. Para aplicações práticas de fiscalização, os limites de peso legais são aplicados somente aos grupos de eixos, não sendo avaliados os pesos dos eixos que compõem cada grupo.

Além da comparação com as metodologias de análise, também são realizadas análises exploratórias da correlação dos erros da amostra com a velocidade dos veículos e com a data e hora da coleta, visando identificar problemas no processo de coleta de dados ou de variabilidade nos resultados apresentados em função da velocidade ou do horário.

4.1. Processamento dos dados

Antes da realização da análise, ocorre o processamento dos dados, no qual os dados brutos são transformados em informações úteis. Durante essa fase, são identificados e corrigidos problemas nos dados de referência, como valores ausentes. Posteriormente, realiza-se a compatibilização dos veículos registrados pelo sistema HS-WIM com o sistema do PPV.

Durante o processamento dos dados, são utilizados métodos de filtragem do conjunto de registros do PPV, com o objetivo de identificar possíveis erros nas informações. Dados que possuíam carga zerada em eixos específicos (no primeiro eixo, por exemplo), foram removidos por meio de um critério de seleção, a fim de selecionar apenas os veículos cujo peso no primeiro e no segundo eixo fosse superior a zero, uma vez que todos os veículos devem possuir pelo menos dois eixos que suportem a carga total do veículo. Além disso, aplicou-se um filtro para remover registros nos quais o PBT fosse inferior a 7.500 Kg, pois está abaixo do peso da estrutura dos veículos sem carga.

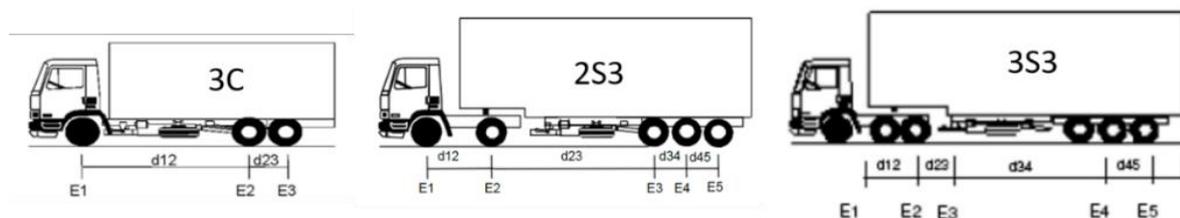
Outra particularidade significativa dos dados coletados que podem comprometer a análise de desempenho é que, em alguns casos, podem ocorrer erros de leitura das placas dos veículos, implicando, portanto, que esses registros fossem eliminados da análise. Também se fez necessária a exclusão dos dados nos quais a classificação dos veículos foi realizada com erros.

A combinação dos dados do HS-WIM com os dados da balança de fiscalização é realizada por meio da correspondência das placas presentes em ambos os registros. Tendo em vista que um veículo pode ter percorrido o trajeto mais de uma vez ao longo do dia. Leva-se em consideração a data e o horário da passagem do veículo, com um intervalo máximo de até 10 minutos de diferença para ser considerada a mesma passagem.

De acordo com o princípio de Pareto (Fávero; Belfiore, 2017), é provável que cerca de 80% do tráfego de veículos seja composto por apenas 20% das classes disponíveis. Logo, no contexto deste estudo, a identificação das classes de veículos mais frequentes no trecho pode facilitar a análise.

No âmbito do sítio de pesquisas de Araranguá/SC, as classes que melhor representam os veículos da frota são as classes 3C, 2S3 e 3S3, apresentadas na – Classes selecionadas para a análise de dados do sistema HS-WIM.

Figura 5 – Classes selecionadas para a análise de dados do sistema HS-WIM



Fonte: FAPEU (2024)

4.2. Erros observados nas amostras

A partir da comparação com os pesos de referência apresentados, calculam-se os erros percentuais para cada registro de pesagem $E_{\%}$, representados da Equação (1), em que “ V_a ” é o valor do PBT e “ V_r ” é o valor de referência.

$$E_{\%} = \frac{V_a - V_r}{V_r} \times 100 \quad (1)$$

Alguns valores de erro percentual apresentam discrepâncias em relação ao conjunto de dados, tanto em termos de PBT quanto em valores por eixo e grupo de eixos. Esses dados fora do padrão geral, chamados de *outliers* (ou “discrepâncias”, em tradução livre), podem afetar os resultados da análise. Existem diversas maneiras de identificar *outliers* em um conjunto de dados, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens (Salgado; Machado; Ohishi, 2016). O modelo escolhido para a detecção de valores que se distanciam de forma considerável do resto da amostra, é o de *boxplot* (ou “gráfico de caixa”), que leva em consideração o centro a dispersão e a distribuição dos dados.

Este método estatístico e visual é baseado em quatro elementos: mediana ou segundo quartil (Q2), quartil inferior (Q1), quartil superior (Q3) e interquartil (IQR). Os quartis, Q1, Q2 e Q3 separam os dados em quatro grupos, em que cada grupo inclui 25% da amostra (ou um quarto). O IQR é a diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil. Para identificar *outliers*, são calculados dois limites adicionais com base o IQR.

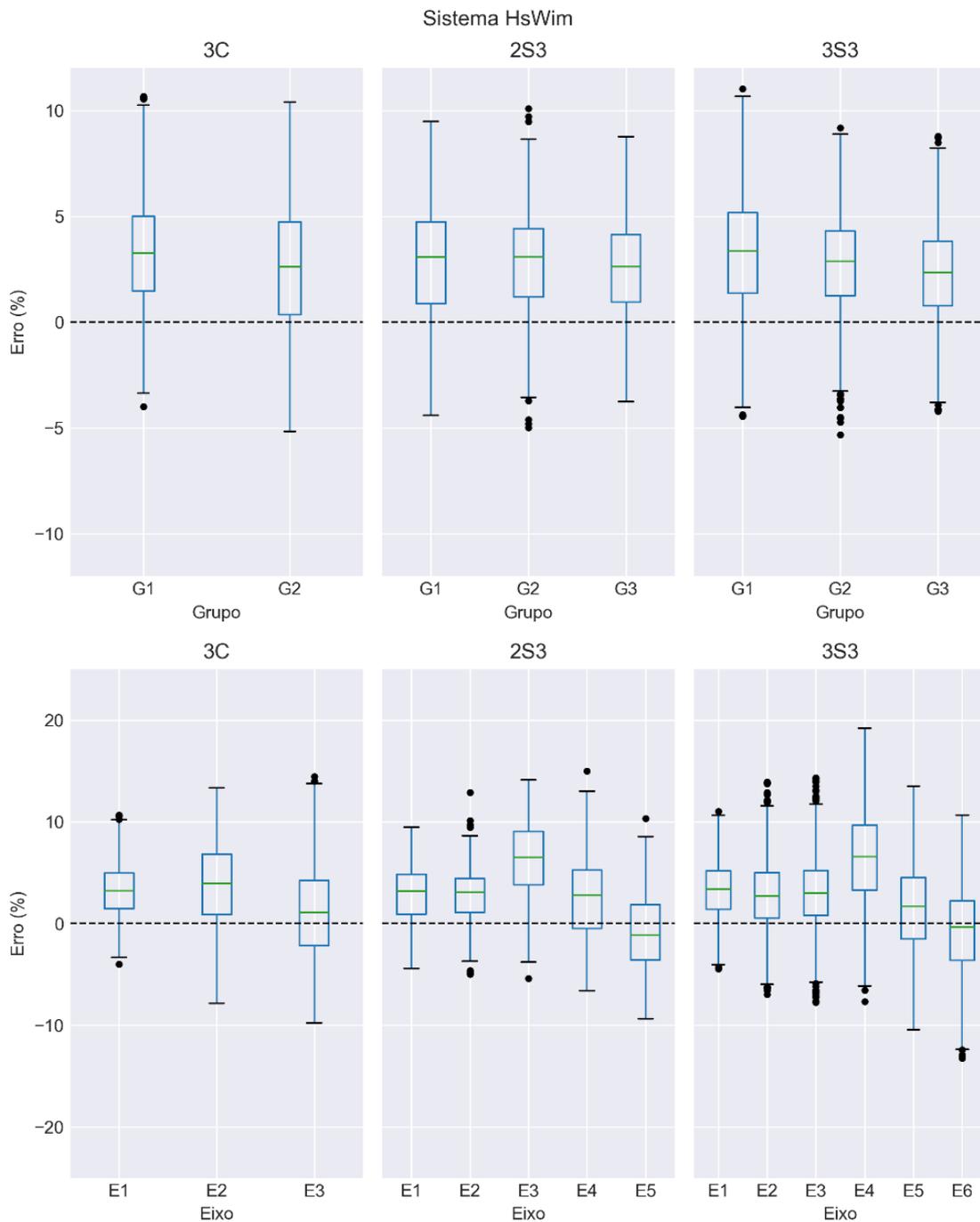
$$\text{Limite superior} = +1.5 \times IQR \quad (2)$$

$$\text{Limite inferior} = Q2 - 1.5 \times IQR \quad (3)$$

Valores que se encontram acima do limite superior ou abaixo do limite inferior são considerados *outliers*. Com isso, os erros percentuais do sistema avaliado puderam ser

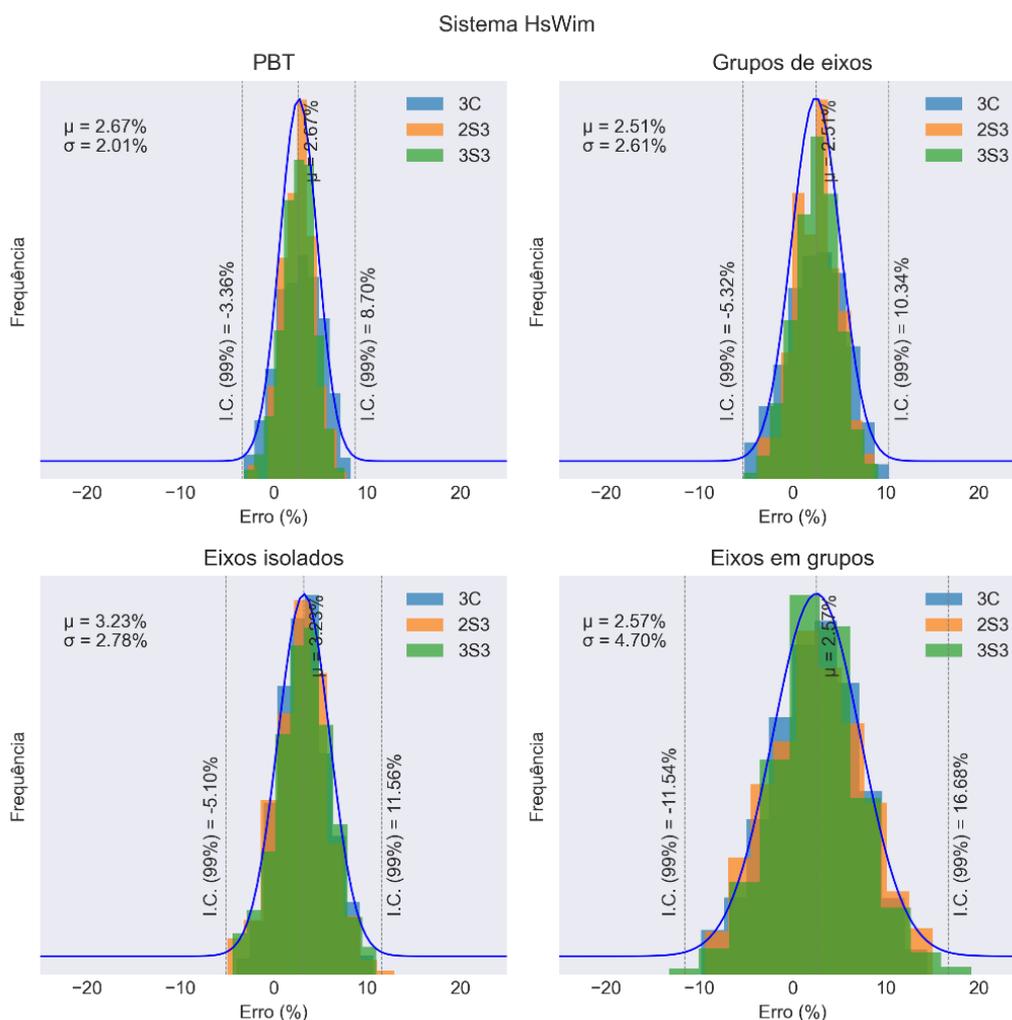
expressos graficamente e as suas distribuições analisadas. Como o método *boxplot* também pode ser utilizado para análise visual, na qual se pode visualizar a distribuição dos erros e, após a remoção de *outliers*, os dados foram “plotados” em gráficos de caixas, apresentados na Figura 6. Assim, o desempenho para cada eixo de cada veículo se torna especialmente útil, permitindo identificar quais são os eixos que apresentam maior ou menor erro. Também, para melhor compreensão, as distribuições estatísticas dos erros observados para o sistema e para cada tipo de medição (PBT, grupos de eixos, eixos isolados ou eixos em grupos) podem ser visualizadas em forma de histogramas na Figura 7.

Figura 6 – Distribuição dos erros por eixo e por grupo de eixo observados no sistema HS-WIM



Fonte: FAPEU (2024)

Figura 7 – Distribuição dos erros percentuais observados no sistema HS-WIM



Fonte: FAPEU (2024)

4.3. Verificação de desempenho em função dos documentos de referência

Os documentos de referência adotados para a análise estabelecem limites de erro máximo admissível para algumas classes determinadas de desempenho. Além disso, eles possuem dois limites diferentes para a situação de verificação inicial do sistema e supervisão metrológica. Os limites utilizados para a comparação com os documentos normativos foram os limites para a supervisão metrológica, e não os para verificação inicial.

Os limites estabelecidos tanto pelo regulamento aprovado pela Portaria INMETRO nº 19/2022 quanto na recomendação OIML R 134-1 estão apresentados na Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11. As distribuições dos erros para o sistema, em comparação com os limites do regulamento do INMETRO, estão apresentadas na Figura 12. Os valores máximos e mínimos de cada gráfico permitem, também, a verificação dos limites da tabela OIML.

Figura 8 – Limites estabelecidos na recomendação OIML R 134-1 para o PBT

Table 2

Accuracy class for vehicle mass	Percentage of conventional value of the vehicle mass (6.7)	
	Initial verification	In-service inspection
0.2	±0.10 %	±0.20 %
0.5	±0.25 %	±0.50 %
1	±0.50 %	±1.00 %
2	±1.00 %	±2.00 %
5	±2.50 %	±5.00 %
10	±5.00 %	±10.00 %

Fonte: OIML (2006)

Figura 9 – Limites estabelecidos na recomendação OIML R 134-1 para eixos e grupos de eixos

Table 4

Accuracy class for single-axle load and axle-group load	Percentage of the corrected mean single-axle load or corrected mean axle-group load	
	Initial verification	In-service inspection
A	±0.50 %	±1.00 %
B	±1.00 %	±2.00 %
C	±1.50 %	±3.00 %
D	±2.00 %	±4.00 %
E	±4.00 %	±8.00 %
F	±8.00 %	±16.00 %

Fonte: OIML (2006)

Figura 10 – Limites do regulamento estabelecido pela Portaria Inmetro nº 019/2022 para o PBT

Tabela 1

Porcentagem do valor verdadeiro convencional da massa do veículo (7.6)		
Classes de exatidão	Aprovação de Modelo, verificação inicial e verificação subsequente (\pm)	Supervisão metrológica (\pm)
1	2,50%	5,00%
2	3,50%	7,00%
3	5,00%	10,00%

Fonte: Brasil (2022)

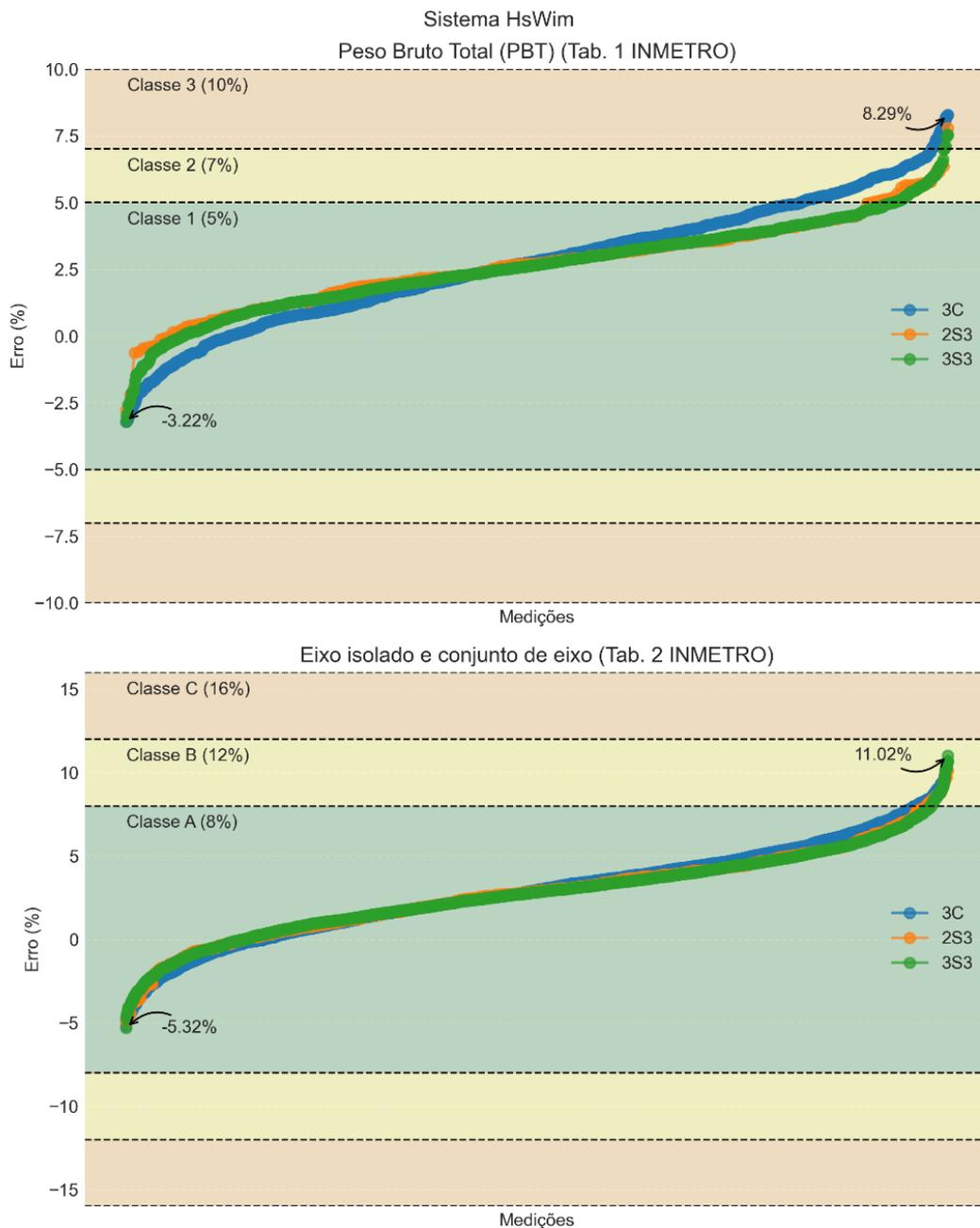
Figura 11 – Limites do regulamento estabelecido pela Portaria INMETRO nº 019/2022 para eixos e grupos de eixos

Tabela 2

Porcentagem do valor verdadeiro convencional da carga estática de referência por eixo isolado (7.7)		
Classes de exatidão	Aprovação de Modelo, verificação inicial e verificação subsequente (\pm)	Supervisão metrológica (\pm)
A	4,00%	8,00%
B	6,00%	12,00%
C	8,00%	16,00%

Fonte: Brasil (2022)

Figura 12 – Distribuição dos erros em função dos limites do INMETRO para o sistema HS-WIM



Fonte: FAPEU (2024)

4.3.1. Verificação estatística com a metodologia COST 323

A metodologia da *European Cooperation in Science and Technology* (COST) foi aplicada em função das distribuições estatísticas de erros para cada tipo de medição (PBT, grupos de eixos, eixos isolados e eixos em grupos) para obter as classificações. As classificações apresentadas pela metodologia são separadas por tipo de medição e a Classificação aceita (*Accepted class*) é considerada como a pior classificação dentre os tipos. O número entre parêntesis da classe

é uma indicação geral do valor dos erros para a classe, por exemplo, a classe “A(5)” indica que, dentro do intervalo de confiança da metodologia, os erros do sistema estão em até 5%. Os resultados para a classificação COST do sistema são apresentados no Quadro 3. **Fonte de referência não encontrada.**

Quadro 3– Dados coletados dos veículos da frota pelo Sistema HS-WIM

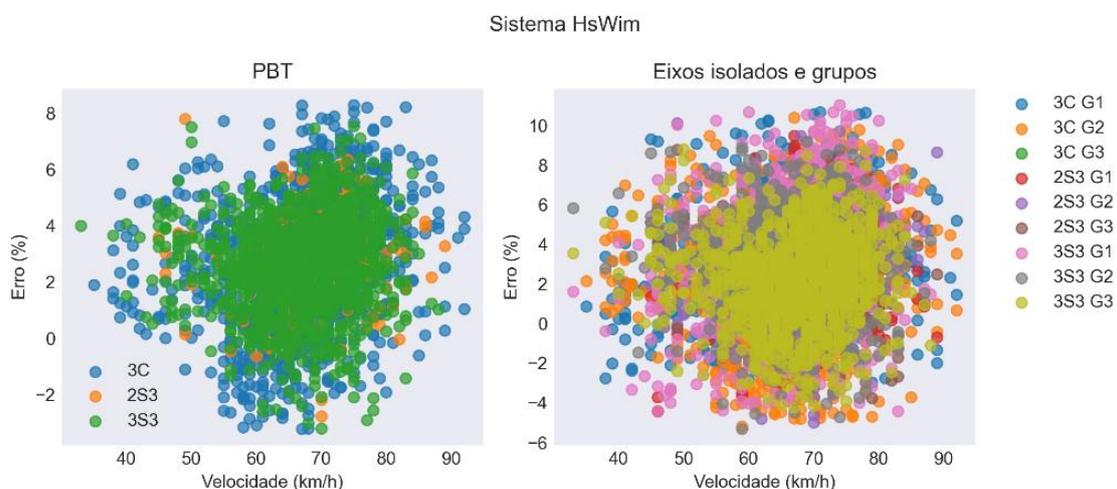
SYSTEM	Number	Identified	Mean	Std deviat	π_o	Class	δ	δ_{min}	δ_c	π	Accepted class
Entity		(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	
Gross weight	2576	100,0	2,67	2,01	96,6	B+(7)	7	6,4	6,4	98,3	B+(7)
Group of axles	3485	100,0	2,51	2,61	96,6	B+(7)	10	7,4	5,2	99,8	
Single axle	2770	100,0	3,23	2,78	96,6	B+(7)	11	8,4	5,3	99,7	
Axle of group	8925	100,0	2,57	4,70	96,7	B+(7)	14	11,4	5,7	98,2	

Fonte: FAPEU (2024)

4.4. Análise exploratória

Foram realizados estudos para investigar a correlação dos erros apresentados pelo sistema com a velocidade das passadas e com o horário da coleta de dados. O objetivo principal deste estudo foi verificar a existência de problemas na coleta de dados, como falhas nos sistemas ou erros sistemáticos em função da velocidade, por exemplo. Isso foi feito por meio de gráficos de dispersão dos erros em função das variáveis investigadas. Desta análise, não foram verificadas correlações ou problemas temporais na coleta dos dados, indicando que o sistema não sofreu falhas ou erros sistemáticos no registro das passadas e que a velocidade dos veículos, dentro dos limites permitido, não influencia nos erros apresentados. Na Figura 1 – Dispersão de erros em função da velocidade para o sistema HS-WIM, é exibido um gráfico de dispersão de erros em função da velocidade aplicados para o sistema HS-WIM.

Figura 1 – Dispersão de erros em função da velocidade para o sistema HS-WIM



Fonte: FAPEU (2024)

Nas figuras abaixo são mostrados os gráficos construídos de dispersão de erros em função do horário da coleta, aplicados para o sistema na Figura 2 – Dispersão de erros em função do horário da coleta para o sistema HS-WIM.

Figura 2 – Dispersão de erros em função do horário da coleta para o sistema HS-WIM



Fonte: FAPEU (2024)

Neste capítulo, foram apresentados os modelos estatísticos utilizados como base para o processamento dos dados brutos que precisam ser tratados antes de serem avaliados. A análise de desempenho do sistema HS-WIM foi realizada por meio da comparação com padrões nacionais e internacionais, o que permite identificar pontos de melhoria e eficácia dos sistemas instalados. No próximo capítulo, serão discutidos os resultados alcançados, exibindo os erros máximos e mínimos de cada caminhão e a classificação alcançada em cada metodologia de avaliação.

5. Análise dos Resultados dos Sistemas

Após gerar os dados de análise do desempenho, este capítulo aborda a discussão dos resultados de desempenho obtido pelo sistema de pesagem de veículos em alta velocidade. Este projeto levanta pontos importantes sobre a capacidade dos sistemas *High Speed Weigh-In-Motion* (HS-WIM), tendo como finalidade a fiscalização direta de peso nas vias brasileiras a partir do uso de tais equipamentos.

Com o objetivo de apresentar uma visão geral dos resultados obtidos para o sistema testado, o Quadro 4 expõe um resumo dos resultados. Além disso, é elaborado um resumo das classificações obtidas nas três metodologias de avaliação adotadas no Quadro 5 e, em seguida, realiza-se uma breve conclusão acerca dos resultados observados neste estudo.

Quadro 4 – Resumo dos resultados obtidos no sistema HS-WIM

Clas.	Estatística	PBT	Grupos de eixo			Eixos					
			G1	G2	G3	E1	E2	E3	E4	E5	E6
3C	Contagem	1189	1103	1103		1189	1189	1189			
	Média	2,7%	3,3%	2,5%		3,3%	3,8%	1,0%			
	Desv. Pad.	2,3%	2,6%	3,1%		2,6%	4,2%	4,7%			
	Mínimo	-3,2%	-4,0%	-5,2%		-4,0%	-7,8%	-9,8%			
	Máximo	8,3%	10,7%	10,4%		10,7%	13,3%	14,4%			
2S3	Contagem	194	188	188	188	194	194	194	194	194	
	Média	2,7%	3,0%	2,8%	2,5%	3,0%	2,8%	6,2%	2,5%	-0,8%	
	Desv. Pad.	1,7%	2,9%	2,7%	2,3%	2,9%	2,8%	3,9%	4,2%	4,0%	
	Mínimo	-2,8%	-4,4%	-5,0%	-3,8%	-4,4%	-5,0%	-5,4%	-6,6%	-9,3%	
	Máximo	7,8%	9,5%	10,1%	8,8%	9,5%	12,9%	14,1%	15,0%	10,3%	
3S3	Contagem	1193	1097	1097	1097	1193	1193	1193	1193	1193	1193
	Média	2,6%	3,3%	2,8%	2,2%	3,3%	2,8%	3,0%	6,6%	1,5%	-0,7%
	Desv. Pad.	1,7%	2,9%	2,4%	2,3%	2,9%	3,4%	3,6%	4,5%	4,1%	4,4%
	Mínimo	-3,2%	-4,4%	-5,3%	-4,2%	-4,4%	-7,0%	-7,8%	-7,7%	-10,4%	-13,3%
	Máximo	7,5%	11,0%	9,2%	8,8%	11,0%	13,9%	14,3%	19,2%	13,5%	10,7%

Fonte: FAPEU (2024)

Quadro 5 – Classes de desempenho atingidas pelo sistema HS-WIM

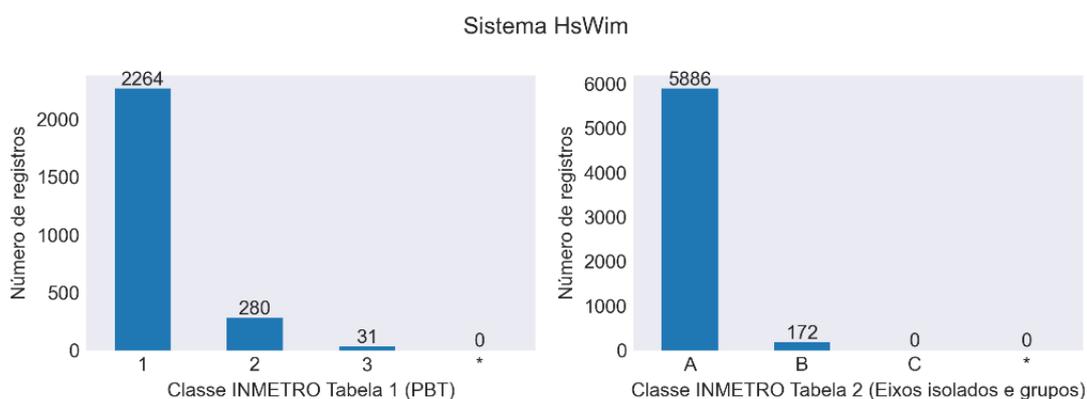
Metodologia	Aferição	Classes de desempenho (classe atingida em destaque)					
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)
COST 323	PBT	A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)
	Grupos de eixos	A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)
	Eixos isolados	A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)
	Eixos de um grupo	A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)
OIML R 134-1	PBT	0.2	0.5	1	2	5	10
	Eixos isolados ou grupos de eixos	A	B	C	D	E	F
Portaria INMETRO nº 019/2022 (supervisão metrológica)	PBT	1		2		3	
	Eixos isolados ou grupos de eixos	A		B		C	

Fonte: FAPEU (2024)

5.1. Discussão dos resultados

Os resultados obtidos indicam que o sistema HS-WIM, presente no sítio de pesquisas de Araranguá/SC, apresenta um desempenho que se enquadra dentro dos limites estabelecidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), sendo classificado como “3B”. Porém, aproximadamente 88% das amostras de PBT alcançaram a Classificação 1, e 97% dos resultados de pesagem por grupo de eixos se encaixam na classificação “A” do INMETRO, conforme ilustra a Figura 13. Isso mostra que diversos avanços significativos foram realizados na área de pesagem em movimento, em que uma pequena parte dos dados não conseguiram atingir a classe máxima determinada pelo regulamento técnico.

Figura 13 – Número de registros do HS-WIM em cada classe do INMETRO



Fonte: FAPEU (2024)

A classificação dos sistemas de pesagem em movimento, de acordo com o método da Organização Internacional de Metrologia Legal (*Organisation Internationale de Métrologie Légale*, OIML), segue uma abordagem semelhante à metodologia implementada pelo INMETRO. Essa classificação caracteriza os sistemas com base no Peso Bruto Total (PBT), nos eixos isolados ou em grupos de eixos.

O resultado obtido para o sistema HS-WIM, para a maior parte dos dados, foram os seguintes:

- Sistema HS-WIM: Classificação 10 para PBT e “F” para eixos isolados, quando avaliado por inspeção em serviço.

O primeiro algarismo da classificação se refere ao erro máximo do PBT, com o número apresentado representando o erro percentual máximo (por exemplo, “5” corresponde a $\pm 5\%$). A letra “F” na classificação está associada a um erro máximo de $\pm 16\%$ para eixos isolados ou grupos de eixos.

Seguindo a especificação da *European Cooperation in Science and Technology* (COST), o sistema foi classificado da seguinte forma:

- Sistema HS-WIM: Classe B+(7).

É importante destacar que a COST não diferencia entre classificações para aprovação inicial ou supervisão metrológica, e também não considera a classe mais baixa obtida em um dos parâmetros de análise. O critério da COST é o mais rigoroso entre os métodos atuais, pois utiliza a pesagem de um único eixo como parâmetro para classificação. No contexto da fiscalização de peso no Brasil, são considerados tanto o PBT quanto os eixos isolados ou em grupos de eixos para o cálculo das penalidades. Caso a COST adotasse um critério semelhante ao da OIML e do INMETRO, os sistemas poderiam ser classificados em classes superiores. Por fim, vale ressaltar que a metodologia da COST é a mais antiga utilizada nessas análises, tendo sido publicada em 1999.

6. Considerações Finais

A avaliação dos resultados dos testes com veículos da frota, conforme prevista na Ação 5 do Plano de Trabalho deste projeto, visa modernizar a fiscalização e monitoração rodoviária com equipamentos de pesagem em alta velocidade. Além de considerar os erros de pesagem para o Peso Bruto Total (PBT), eixos isolados e grupos de eixos, é crucial assegurar a eficiência do sistema *High Speed Weigh-In-Motion* (HS-WIM) ao longo do tempo. Por esse motivo, o teste com veículos que trafegam pelas pistas instrumentadas foi dividido em duas etapas, sendo este documento a segunda parte da análise do Produto 7.

O Produto 7.2 segue os mesmos princípios de avaliação do 7.1, sendo eles: critérios de classificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), da *European Cooperation in Science and Technology* (COST) e da Organização Internacional de Metrologia Legal (*Organisation Internationale de Métrologie Légale*, OIML), tendo como grande diferença o espaçamento no tempo da coleta de dados e o tratamento dos dados brutos. O resultado mais significativo deste estudo foi obtido com base nos limites estabelecidos pelo regulamento aprovado pela Portaria INMETRO nº 19/2022, que considera os parâmetros para a supervisão metrológica de sistemas de pesagem em movimento para fiscalização direta de peso. O sistema comercial demonstrou ter um desempenho aceitável, podendo alcançar a classificação “3B”, tendo como erro percentual, em relação ao PBT, um máximo de 8,4% e mínimo de -3,2%. Além disso, também foi apresentada a classificação do sistema com base nos padrões internacionais OIML e COST 323.

Apesar de terem se passado cinco meses desde a última calibração, o sistema comercial instalado no sítio de pesquisa de Araranguá/SC continua operacional, mantendo seu desempenho estável e sem grandes variações. Validando, assim, a sua repetibilidade ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Portaria nº 19, de 12 de janeiro de 2022.** Aprova o Regulamento Técnico Metrológico consolidado para instrumentos de pesagem automáticos de veículos rodoviários em movimento. Brasília/DF: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-19-de-12-de-janeiro-de-2022-375564556>. Acesso em: 09 jul. 2024.

COST. **COST 323: Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report.** Versão 3.0. European WIM Specification. Bruxelas, 1999. Disponível em: https://www.is-wim.org/doc/ijhd_hvs_jacob.pdf. Acesso em: 09 jul. 2024.

COST. **COST 323: Weigh-in-Motion of Road Vehicles European WIM Specification: Final Report.** Appendix I. EUA: Cost Project, 1999. 83 p.

OIML. **OIML R 134-1: Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads – Part 1: Metrological and technical requirements – Tests.** [S.l.]: Organisation Internationale de Métrologie Légale, 2006. 81p. Disponível em: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r134-1-e06.pdf. Acesso em: 09 jul. 2024.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel, SPSS e Stata.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

SALGADO, Ricardo Menezes; MACHADO, Tadeu Carvalho; OHISHI, Takaaki. Intelligent Models to Identification and Treatment of Outliers in Electrical Load Data. **IEEE Latin America Transactions**, [S.l.], v. 14, n. 10, p. 4279-4286, out. 2016. Mensal. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7786306>. Acesso em: 09 jul. 2024.



CCR *ViaCosteira*

CCR Via Costeira
Rua Silvio Burigo, 555 - Oficinas
CEP. 88702-500 - Tubarão - SC
0800-255-5550 - ouvidoria.viacosteira@grupoccr.com.br