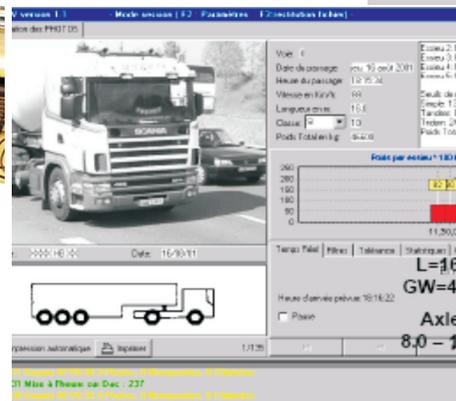


Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento



Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento

Convênio TT 102/2007

Sistema MS WIM

Dezembro de 2008



Laboratório de Transportes e Logística



NEP

Núcleo de Estudos de Pesagem

Convênio TT 102/2007 DNIT / UFSC
IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE PESAGEM EM MOVIMENTO

FICHA TÉCNICA

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT

Luiz Antonio Pagot
Diretor Geral DNIT

Hideraldo Luiz Caron
Diretor de Infra-Estrutura Rodoviária

Luiz Cláudio dos Santos Varejão
Coordenador Geral de Operações Rodoviárias

João Batista Berreta Neto
Coordenador de Operações Rodoviárias

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL/DNIT/SC

João José dos Santos
Superintendente Regional de Santa Catarina

Edemar Martins
Supervisor de Operações

Névio Antônio Carvalho
Área de Engenharia e Segurança de Trânsito

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Alvaro Toubes Prata
Reitor

Carlos Alberto Justo da Silva
Vice-Reitor

Edison da Rosa
Diretor do Centro Tecnológico

Antonio Edésio Jungles
Chefe do Departamento de Engenharia Civil

LABORATÓRIO DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA - LABTRANS

Amir Mattar Valente, Dr.
Coordenador Técnico do Convênio

NÚCLEO DE ESTUDOS DE PESAGEM

EQUIPE TÉCNICA

Valter Zanela Tani, Dr.
Hélio Goltsman, Eng°. Eletrônico
Márcio Roberto Lima Paiva, Dr.
Fernando da Rocha Pantoja, PhD.
Flavio De Mori, Dr.
Gustavo Garcia Otto, Eng°. Civil

EQUIPE DE APOIO

Daniel Moura Aragão, Administrador

APRESENTAÇÃO

APRESENTAÇÃO

Trata o presente relatório de um produto do Convênio 102/2007 – Projeto “Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento”, firmado entre o Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes - DNIT e a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

O projeto em tela prevê, como uma de suas mais importantes etapas, a realização de um experimento para avaliação do estado-da-arte internacional em sistemas de pesagem em movimento, sob condições brasileiras de operação.

Tendo em vista a experiência internacional, avaliada através de pesquisa da literatura especializada e, sobretudo, de uma viagem de estudo realizada pela equipe do projeto aos países Europeus mais avançados no assunto, decidiu-se focar o experimento nos sistemas de pesagem em movimento com múltiplos sensores (MS-WIM).

O presente relatório aborda no Capítulo 1, de forma expedita, com mínimo possível de matemática e pautada nas publicações existentes, a fundamentação teórica da tecnologia de múltiplos sensores, bases e premissas assumidas. É também apresentada nesse capítulo a derivação de uma métrica parametrizada para avaliação de desempenho de sistemas WIM com múltiplos sensores. Essa parametrização tem o valor agregado de permitir a avaliação incremental do uso de sensores adicionais, fornecendo com isso também uma ferramenta objetiva para análise de custo benefício de soluções com múltiplos sensores. A métrica, acima de tudo de aplicação prática e tempestiva, acredita-se que dispense o emprego de especialistas no assunto para decisões práticas do dia a dia.

Forma contínua, no Capítulo 2, é apresentada a base teórica para o desenvolvimento de um procedimento de projeto, bem como é apresentado um conjunto de tabelas, gráficos e formulações para o projeto de múltiplos sensores, com ênfase na configuração e espaçamento entre sensores, onde, para tal, uso é feito de uma ferramenta de pré-projeto especificamente desenvolvida para esse fim. Como subproduto dessa ferramenta de projeto, tem-se que ela possibilita verificar os impactos das faixas de velocidades e faixas de frequências de oscilação das suspensões em determinada configuração (espaçamento e número) de sensores de



um sistema WIM, permitindo com isso projetar estruturas MS WIM para diversos cenários de tráfego (tipos de veículos e velocidades).

É ainda apresentado e descrito, no Capítulo 3, sempre de forma sucinta e objetiva, o fluxograma funcional de um sistema de pesagem de múltiplos sensores com todos os seus detalhamentos. Isso permite a visualização do sistema como um todo, além das interdependências entre os diversos elementos de um Sistema WIM de múltiplos sensores, aí incluídos os sensores de presença, câmeras, os sensores e sua eletrônica de forma geral.

No Capítulo 4 é apresentada uma abrangente bibliografia que serviu de base para a consecução do presente relatório.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
MS WIM	Sistema de pesagem em movimento com múltiplos sensores

LISTA DE FIGURAS



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Proporção de veículos na Rodovia BR-101 Araranguá.	16
Figura 2 -	Seção transversal para o arranjo de n sensores WIM, força $p(t)$ transversal e velocidade V	19
Figura 3 –	Curva de erro para $n=7$ com 5 ângulos de fase (linha pontilhada) e a envoltória do erro (linha cheia)	22
Figura 4 –	Curvas da envoltória de erros para (a) $n=2$, (b) $n=3$, (c) $n=4$ e (d) $n=5$	22
Figura 5 –	Curva da envoltória do erro para $n=6$, apresentando a repetição padrão ($0 \leq \delta < 1$) devido ao efeito de “aliasing”.	23
Figura 6 -	Variação de velocidade permitida para espaçamento convencional “ótimo”, frequência da suspensão 1Hz e velocidade média 50Km/h	43
Figura 7 -	Variação do espaçamento convencional “ótimo” para frequência da suspensão 1Hz e velocidade média 50Km/h	44
Figura 8 -	Variação permitida da frequência da suspensão para espaçamento convencional “ótimo”, frequência da suspensão 1Hz e velocidade média 50Km/h.	45
Figura 9 –	Diagrama esquemático do experimento	48
Figura 10 –	Diagrama detalhado funcional do sistema WIM completo (1ª parte – estrutura de aquisição de dados e de sinais de controle – trigger)	50
Figura 11 –	Diagrama detalhado funcional do sistema WIM completo (2ª parte – pré-processamento da força analógica em valor digitalizado da força)	51



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 1 hz	33
Tabela 2 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 1,5 hz	34
Tabela 3 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 2 Hz	36
Tabela 4 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 2,5 Hz	37
Tabela 5 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 3 Hz	38
Tabela 6 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 3,5 Hz	40
Tabela 7 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 4,0 Hz	41



SUMÁRIO

Capítulo 1 - TEORIA DE PESAGEM EM MOVIMENTO COM MÚLTIPLOS SENSORES	14
1 Teoria de Pesagem em Movimento com Múltiplos Sensores	15
1.1 Introdução	15
1.2 Teoria	19
1.2.1 Entrada Senoidal.....	19
1.2.2 Entrada Probabilística	23
1.3 Medidas de Desempenho de um sistema WIM	25
Capítulo 2 – BASES PARA PROJETO E ANÁLISE DE CONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS MS WIM	28
2 Bases para Projeto e Análise de Configuração de Sistemas MS WIM	29
2.1 Introdução	29
2.2 Desenvolvimento Teórico	29
2.3 Tabelas e Resultados para Projeto	32
Capítulo 3 – DESCRIÇÃO FUNCIONAL DO SISTEMA WIM.....	46
3 Descrição Funcional do Sistema WIM	47
3.1 Introdução	47
3.2 Detalhamento Funcional do Sistema WIM	49
Capítulo 4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
4 Referências Bibliográficas.....	56

**CAPITULO 1 - TEORIA DE PESAGEM EM MOVIMENTO COM
MÚLTIPLOS SENSORES**



1 TEORIA DE PESAGEM EM MOVIMENTO COM MÚLTIPLOS SENSORES

1.1 Introdução

A vibração dos veículos de carga devido à rugosidade da superfície dos pavimentos resulta numa flutuação dos valores de forças dinâmicas aplicadas, principalmente das componentes verticais das forças. Existem dois tipos de frequências, estatisticamente distintas, encontradas em estudos realizados no exterior e, de forma preliminar, nos exemplos de casos demonstrados por entendimentos¹ com a empresa PLATINA Ltda. ao longo de diversos contatos visando a estruturação da pesquisa de frequência de oscilação de suspensões de veículos.

Pode-se dividir os tipos de frequências em dois grupos:

- ⊙ Baixas frequências (de 1,5 a 4,5 Hz): Massa elasticamente sustentada, da interação entre carga transportada e o tipo de suspensão.
- ⊙ Altas frequências (de 8 a 15 Hz): Massa não elasticamente sustentada. A vibração do material do rodado no contato pneu/pavimento.

As frequências, ou os comprimentos de onda, apresentam uma variação devido às irregularidades na superfície do pavimento; no caso de veículos a 100 km/h os valores dos comprimentos de onda podem variar de 6,2 m a 18,5 m (para 1,5 Hz e 4,5 Hz respectivamente) e 1,9 m a 3,5 metros (de forma análoga para as frequências de 8 Hz e 15 Hz), respectivamente para os dois tipos de frequência.

Estudos experimentais realizados mostram que as frequências baixas (conjunto carga transportada e tipo de suspensão) são as principais responsáveis pelas

¹ A empresa PLATINA Ltda encontra-se em processo de contratação visando proceder a análise de sistemas de suspensão de veículos do tipo 2C, 3C, 2S2 e 2s3. Os veículos dessas classes DNIT foram os veículos prevalentes (mais de 70% do total) encontrados na pesquisa de tráfego realizada pelo presente projeto na rodovia BR-101 em Araranguá, estado de S.Catarina

forças dinâmicas gerada pelos veículos nas rodovias, exceto para os veículos com suspensão com pouco amortecimento por grupo de eixos (em tandem). A pesquisa feita em Araranguá demonstrou número reduzido de veículos (menos de 5%) dessa natureza na rodovia BR-101 em Araranguá.

É muito difícil obter com exatidão informações sobre a população dos tipos de suspensão para qualquer rodovia. No entanto, pode-se estimar, de forma preliminar e com base em entendimentos mantidos com a PLATINA Ltda. em face dos resultados de pesquisa de tráfego efetuada por uma semana corrida na área de Araranguá, na rodovia palco da pesquisa MS WIM, a população dos tipos de veículos e conseqüentemente inferir os tipos prevalentes de suspensão. O estudo de tráfego conduzido dentro do projeto estimou a distribuição dos veículos de carga conforme mostrado na Figura 1.

Classe de Veículo	Percentual da Frota (%)
3C	30,57
2S3	24,82
3S3	13,13
2C	11,21
Outras	20,27

Figura 1 - Proporção de veículos na Rodovia BR-101 Araranguá.

Da distribuição da frota fornecida pela pesquisa de tráfego a qual forneceu os dados acima pode-se de forma preliminar estimar que aproximadamente 70% dos veículos tendem a ter suspensões cujas frequências de oscilação devem se situar entre 1,5Hz e 3,5Hz². Estes dados são muito próximos aos resultados observados em pesquisas efetuadas em outros países (Europa e Estados Unidos).

Conseqüentemente pode ser afirmado com uma confiança razoável que a maioria das suspensões em uso pelos caminhões é do tipo que geram forças

² A ser confirmado em estudos posteriores já em estágio avançado de execução



dinâmicas de baixa frequência. Estas informações irão nortear o projeto de sistemas de múltiplos sensores para pesagem em movimento sendo levado a efeito.

Um sistema WIM com um único sensor de força utiliza uma única amostra do histórico da força gerado no contato pneu/pavimento como uma estimativa da carga estática. Para tal sistema, assumindo perfeita precisão do sensor, pode ser demonstrado que o desvio padrão esperado do erro da estimativa da carga estática para um rodado em particular é o valor médio quadrático (ou seja, o valor RMS) da força dinâmica do pneu.

Sendo assim, a precisão de um sistema com um único sensor WIM é limitada fundamentalmente pela dinâmica do veículo. Uma solução imediata e paliativa para este problema é garantir que a vibração da carga seja pequena ao se passar o veículo sobre o sensor, sendo uma solução a construção de uma camada de rolamento mais suave possível (pavimento de concreto tem sido a solução sugerida) nos 100 metros que antecedem o local de pesagem em movimento, tendo em vista que esses 100m caracterizam a área de influência do efeito da pista sobre o rodado (após 100m é demonstrado que o efeito de um “obstáculo” sobre a força dinâmica do veículo já está amortecido a valores insignificantes – bem menores do que 0,1% do peso estático na velocidade de 30 a 100 km/h).

Contudo, essa solução implica em custos elevados e na necessidade de se construir trechos de pistas de concreto nos locais previstos para a colocação de sistemas de pesagem dinâmicos de um ou dois sensores, o que sem dúvida, apresenta considerável impacto negativo para a aplicação da solução.

No entanto, o presente domínio das tecnologias e dos processos construtivos de sensores WIM de baixo custo possibilitam a utilização de dois ou, preferencialmente, mais sensores ao longo de cada trilha de roda, de maneira a compensar os efeitos dinâmicos da força na determinação da carga estática por eixo e a conseqüente determinação do peso total de veículos.

Existe uma variedade de maneiras de se montar um arranjo de sensores para se estimar a carga estática. Algumas possibilidades são descritas na literatura, entre elas trabalhos com simulações numéricas de arranjos para WIM com 1, 2,



9, 19 e 81 sensores, variando-se o arranjo espacial, incluindo-se espaçamentos dos sensores de forma uniforme, geométrica e logarítmica. Em particular foram obtidos excelentes resultados para 9 sensores, mesmo com arranjo espacial uniforme, utilizando-se do cálculo da média dos mínimos quadrados para se corrigir a força da componente dominante da expansão de Fourier obtida da decomposição das forças dinâmicas em suas bases ortogonais.

Para efeito teórico e para simplificar os resultados (e sem perda de generalidade), será considerado nesse intróito teórico sobre múltiplos sensores um arranjo espacial WIM uniformemente espaçado. Assume-se ainda que o resultado individual de cada sensor é a média de várias passagens sobre cada um dos sensores, dentro de um processo ainda que aleatório (com pequena variância) e ergódico, e que permite estimar a carga estática.

O propósito da teoria apresentada é prover uma base para o entendimento do problema e consolidar um procedimento simples para colocar os sensores WIM na rodovia, sendo conhecidas as velocidades médias dos veículos de carga e a distribuição (ou os valores relevantes) das frequências de suspensão dessa frota.

Da teoria se torna evidente que com um pequeno número de sensores e pequena computação, um método de médias simples já forneceria resultados com precisão, mesmo quando comparados a métodos mais sofisticados de estimativas de valores a partir de seqüência de dados. No entanto, como poderá ser visto mais adiante, a precisão é, de certa forma, extremamente dependente da velocidade do tráfego, assumindo-se a frequência da suspensão dentro de limites e conhecida, uma vez que isto se reflete no comprimento de onda e conseqüentemente do critério de amostragem (leia-se: nos pontos de amostragem e, portanto, espaçamento entre sensores). Contudo, como será demonstrada, essa limitação torna-se menos importante à medida que se utilizam mais sensores, notadamente a partir da utilização de 4 sensores devidamente espaçados.

1.2 Teoria

1.2.1 Entrada Senoidal

Pode-se começar a análise com o cálculo da resposta do arranjo de múltiplos sensores WIM por meio da modelagem da força senoidal $p(t)$ (do pneu sobre a pista ou sensor) definida por:

$$p(t) = P_0 + P \sin(\omega.t + \phi)$$

onde,

P_0 = Força estática do pneu.

P = Amplitude da força dinâmica do pneu.

ω = frequência angular.

ϕ = ângulo de fase (arbitrário).

t = tempo.

A força $p(t)$ é a força considerada para manter a velocidade constante V sobre um arranjo de n sensores, igualmente espaçadas por Δ uns dos outros, conforme a Figura 2.

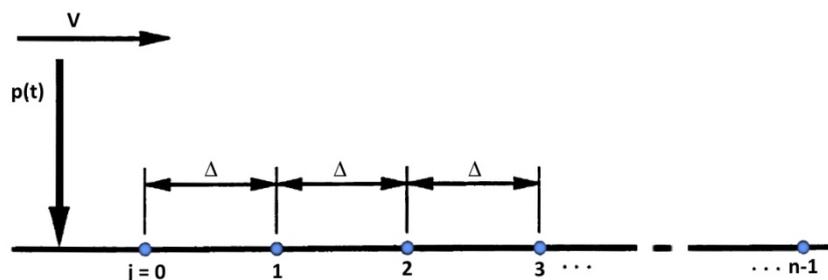


Figura 2 - Seção transversal para o arranjo de n sensores WIM, força $p(t)$ transversal e velocidade V .

Assume-se que os sensores não possuem ruído (ou que os ruídos presentes são não significativos) e que estão perfeitamente ajustados (calibrados) para que a resposta de cada sensor seja a força dinâmica $p(t)$ aplicada sobre o sensor.

A resposta do arranjo faz uso da média aritmética das respostas individuais de cada sensor, sendo essa variável denotada por P . Para $t=0$, assume-se que $p(t)$ é a força sobre o primeiro sensor, e então a resposta do arranjo é:

$$\bar{P} = P_0 + \frac{P}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \sin\left(\frac{j\omega\Delta}{V} + \phi\right)$$

onde uso se fez do fato que $t=\Delta V$.

Define-se o erro WIM adimensional ε por:

$$\varepsilon = \frac{(\bar{P} + P_0)}{P}$$

e o espaçamento adimensional δ por:

$$\delta = \frac{\omega\Delta}{2\pi V} = \frac{\Delta}{V/f}$$

onde f = frequência em Hertz correspondente à frequência angular em radianos ω .

Então a equação do erro torna-se:

$$\varepsilon(n, \delta, \phi) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \sin(j2\pi\delta + \phi)$$

Assume-se ainda que ϕ é uma variável aleatória com uma função densidade de probabilidade uniforme $g(\phi)$, com a integral definida entre os limites da variável ϕ igual a 1 (por motivos óbvios), definida por:

$$g(\phi) = \frac{1}{2\pi} \quad \text{para valores } -\pi < \phi < \pi$$

$$g(\phi) = 0 \quad \text{para valores fora do intervalo}$$

Então, o valor esperado para o erro médio quadrático pode ser encontrado pelas equações de ε e de $g(t)$ e pela definição do valor esperado como segue:

$$E[\varepsilon(n, \delta, \phi)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(n, \delta, \phi)^2 g(\phi) d\phi$$

onde $E[]$ é operador valor esperado, e a integral tem valor 0 para o intervalo fora de $-\pi < \phi < \pi$

Com uma adequada manipulação (substituição por série da integral definida dentro do intervalo $-\pi$ a π) pode ser demonstrado que a integral acima pode ser descrita da seguinte forma:

$$E[\varepsilon(n, \delta, \phi)^2] = \frac{1}{2n} + \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n (n-k) \cos(k2\pi\delta)$$

O erro médio quadrático, sendo dado pela raiz quadrada do valor esperado, pode ser dado por:

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{E[\varepsilon(n, \delta, \phi)^2]}$$

Visando fornecer uma envoltória (limites máximos e mínimos) para o erro, o “pico” ou o “envelope” do erro ε do erro RMS é dado então por:

$$\hat{\varepsilon}(n, \delta) = \pm \sqrt{2\varepsilon_{RMS}} = \pm \left[\frac{1}{n} + \frac{2}{n^2} \sum_{k=1}^n (n-k) \cos(k2\pi\delta) \right]^{1/2}$$

A Figura 3 apresenta a curva da equação relativa ao erro para $n=7$ com 5 diferentes ângulos de fase $\phi = 2\pi/5, 4\pi/5, \dots, 2\pi$ (linha tracejada).

Ainda na Figura 3, encontra-se a curva de envoltória do erro dada pela equação da envoltória de erro apresentada, em linha contínua. Pode-se visualizar que a linha sólida envolve as linhas tracejadas e que correspondem ao pior caso para qualquer ângulo de fase ϕ , em um arranjo com n sensores e espaçamento adimensional δ .

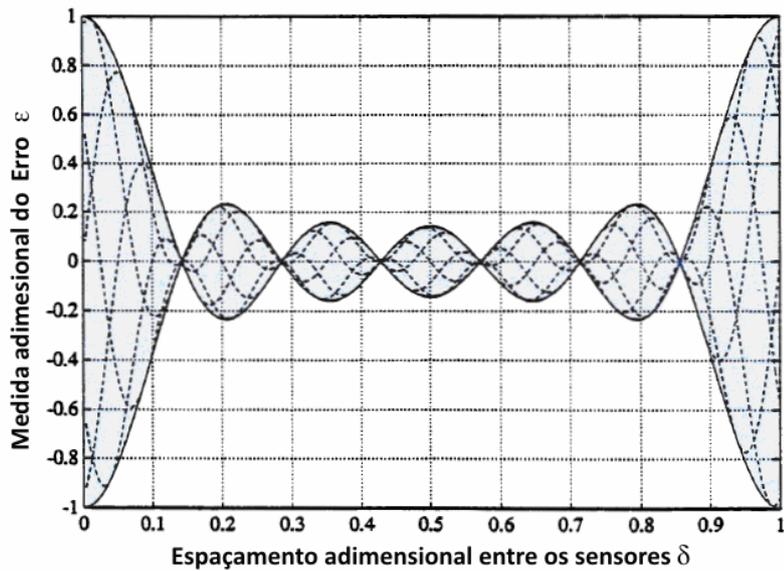


Figura 3 – Curva de erro para $n=7$ com 5 ângulos de fase (linha pontilhada) e a envoltória do erro (linha cheia)

A Figura 4 mostra as características da envoltória do erro em função de (n, δ) para $n=2$ a 5.

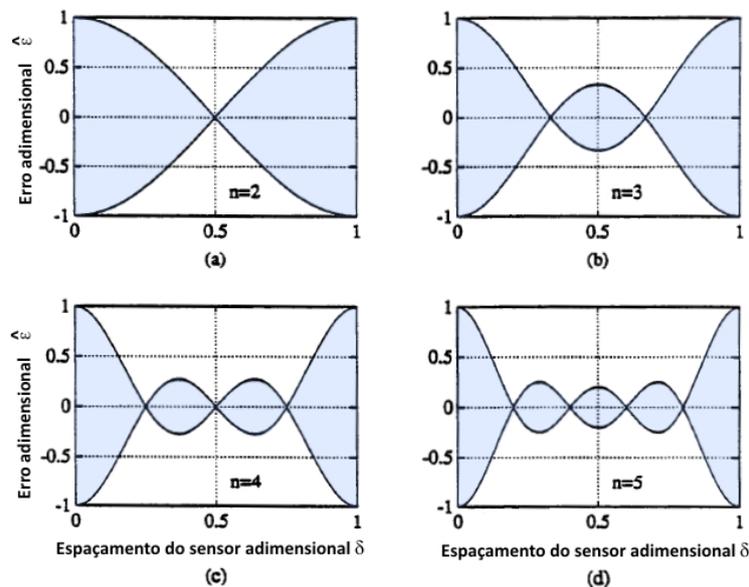


Figura 4 – Curvas da envoltória de erros para (a) $n=2$, (b) $n=3$, (c) $n=4$ e (d) $n=5$.

Pela simples inspeção da figura (e obviamente respaldado na equação do erro e da envoltória dos erros), quatro observações importantes podem ser deduzidas:

- ⊙ O erro é unitário para os valores inteiros de δ . Este ponto corresponde à amostra de pontos (sensores) espaçados em números inteiros de ciclo isolados da força dinâmica.
- ⊙ Existe uma “célula unitária” padrão, entre $0 \leq \delta < 1$, e essa célula repete-se para cada valor inteiro de δ e é simétrico por volta de $\delta = 0,5; 1,5; 2,5 \dots$ etc. Isto pode ser visto na Figura 5, para $n=6$.
- ⊙ Em cada célula existem $(n-1)$ zeros para os valores de $\delta = \delta_k$ correspondendo a δ_k com $k=1, 2, 3 \dots (n-1), (n+1), (n+2) \dots k \neq n, 2n, 3n$. Assim a amplitude de δ entre o primeiro e o último zero na célula unitária ($\delta_1=1/n$ a $\delta_{n-1}=(n-1)/n$) aumenta com n .
- ⊙ A região entre os zeros é a região no qual o erro adimensional é consistentemente pequeno, aumentando fortemente à medida que se aproxima das extremidades da célula.

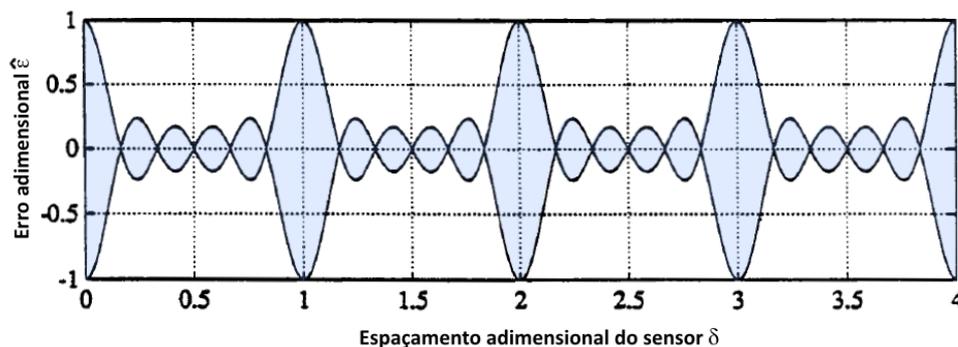


Figura 5 – Curva da envoltória do erro para $n=6$, apresentando a repetição padrão ($0 \leq \delta < 1$) devido ao efeito de “aliasing”.

1.2.2 Entrada Probabilística

Para valores particulares de n , velocidade média V e do espaçamento entre sensores Δ a equação de erro pode ser considerada como um “filtro”, no qual o pior caso de erro recai para a força dinâmica na componente da frequência ω .

Tendo em vista o comportamento estatístico (ou melhor, probabilístico) do sistema WIM (sensores, rugosidade do pavimento, etc) é extremamente útil

considerar-se o comportamento do erro na presença de entradas probabilísticas tanto da rugosidade do pavimento como da força do pneu sobre o sensor (pavimento). Nesse caso, faz-se uso das respectivas grandezas dadas em termos de densidades espectrais médias quadradas, tanto para o erro como para a excitação, isto é, a força do pneu sobre o pavimento (sensor).

Utilizando-se da relação de entrada/saída para um sistema padrão linear sujeito a uma excitação aleatória, a densidade espectral média quadrada da medida do erro $S_{ee}(\omega)$ devido à entrada dada também na forma de uma densidade espectral da força do pneu $S_{pp}(\omega)$ é dado por:

$$S_{ee}(\omega) = \hat{\varepsilon}(n, \omega\Delta / 2\pi V)^2 S_{pp}(\omega) \quad \text{para } -\infty < \omega < +\infty$$

O valor esperado do erro médio quadrático do processo estacionário aleatório é a área abaixo da densidade espectral média quadrada de erro versus frequência. Conseqüentemente, o pior caso para o valor médio quadrático (RMS) do erro σ num arranjo WIM para um sistema de n sensores é, de forma análoga ao obtido para a entrada senoidal determinística, dado por:

$$\sigma(n) = \left[2 \int_0^{\infty} \hat{\varepsilon}(n, \omega\Delta / 2\pi V)^2 S_{pp}(\omega) d\omega \right]^{1/2}$$

onde a integral está sendo avaliada de 0 a $+\infty$, daí o fator 2.

A equação apresentada pode ser avaliada numericamente se a entrada da densidade espectral de força $S_{pp}(\omega)$ for conhecida³.

Convém outra forma de observar o modelo visando aplicação imediata ao caso em tela. Nota-se que a equação apresenta o erro médio quadrático para uma

³ Está em processo de consecução um experimento na pista de teste que, dentre outras coisas, prevê levantar a distribuição (ou densidade) espectral de força no pavimento para permitir uma dupla avaliação e análise do modelo adotado no presente projeto e garantir a fidedignidade dos resultados derivados. Cumpre mencionar que tal experimento levará também à caracterização de uma sistemática (proposta) de calibração e aferição de sistemas MS WIM futuros.



força de pneu aleatória estacionária passando sobre um “conjunto” de n sensores WIM.

Conforme o entendimento, isto pode ser considerado também, em se raciocinando com uma outra geometria, como sendo o valor esperado do desvio padrão para a estimativa de erro da carga estática para diferentes eixos passando sobre um único local de pesagem em movimento.

Permite então que se transforme o problema da distribuição de forças ao longo do sistema WIM no valor da distribuição de forças devido aos eixos mas passando por somente um sensor.

Para tanto, é necessário assumir-se que as forças da roda são amostras para um processo aleatório não repetitivo, premissa essa que é razoável para a maioria das circunstâncias.

Está também assumido, sendo essa hipótese plenamente razoável, que a superfície do pavimento onde se encontra o sistema WIM não possui uma rugosidade anormal entre diversos sensores e que todas as suspensões individuais geram densidades espectrais de força de pneu similares.

É óbvio que continuam válidas as premissas de que o modelo assumido está isento de comportamentos não lineares.

1.3 Medidas de Desempenho de um sistema WIM

Como é comum definir-se desempenho através de medidas adimensionais, pode-se definir algumas medidas adimensionais do desempenho também para os sistemas WIM. Define-se o “ Coeficiente de Variação do Erro” (*CVE*) $\rho(n)$, para um sistema de n sensores por:

$$\rho(n) = \frac{\sigma(n)}{P_0}$$

onde P_0 é a carga estático do eixo.

O parâmetro usado para caracterizar a força dinâmica dos pneus é o “Coeficiente Dinâmico de Carga” (*CDC*), definido por:



$$CDC = \frac{RMSforça_dinamica_pneu}{P_0}$$

Para um sistema WIM com único sensor ($n=1$), a equação para o erro médio quadrático fornece $\delta(1, \delta)=1$ e a equação probabilística de erro passa a ser:

$$\sigma_{(1)} = \left[2 \int_0^{\infty} S_{pp}(\omega) d\omega \right]^{1/2}$$

Assim o *CDC* pode ser interpretado alternativamente como:

$$CDC = \frac{\sigma_{(1)}}{P_0} = \rho(1)$$

Conseqüentemente o valor esperado para o coeficiente de variação de erro de um sistema com um único sensor $\rho(1)$ é simplesmente o *CDC* da carga dinâmica por eixo.

É importante frisar que para as condições usuais de rugosidade da rodovia e de velocidade (velocidade diretriz), o *CDC* pode variar entre 10% e 30% (situação da Europa e Estados Unidos).

No Brasil são esperados, devido aos veículos de carga brasileiros e rodovias, valores de *CDC* da ordem de 30% ou superiores, principalmente devido ao estado das rodovias e às condições das suspensões com pouco amortecimento (falta de manutenção adequada e frota extremamente antiga).

Ainda definindo-se parâmetros para desempenho de sistemas, conceitua-se o “Coeficiente de Acurácia Estática” (*CAE*), η , que representa a melhora proporcional na precisão relativa para aferição da carga estática por intermédio da carga dinâmica, para um sistema com único sensor WIM, que passa a ser definido por:

$$\eta(n) = \frac{\rho_{(1)} - \rho_{(n)}}{\rho_{(1)}} = \frac{CDC - \rho_{(n)}}{CDC}$$

Portanto, η pode ser percebido como uma medida do desempenho (acurácia) incremental devido a múltiplos sensores:



- ⊙ Se $\rho(n) = \rho(1)$, não há melhora, uma vez que representa um sistema com único sensor WIM, então $\eta(n) = 0$.
- ⊙ Se $\rho(n) = 0$ (por exemplo, erro zero), então $\eta(n) = 1$ o que corresponde a um desempenho “perfeito” do sistema WIM.

Cumprir observar que o modelo não leva em consideração os detalhes da não-linearidade da suspensão e as complexidades do movimento da massa sustentada, tipicamente encontradas nos veículos pesados.

Consegue-se, com isto, congrega-se de forma parametrizada, num só parâmetro, a eficiência de uma estrutura de múltiplos sensores visando balizar a análise comparativa de estruturas WIM de pesagem com múltiplos sensores com número diferente de sensores.

Essa parametrização possibilita verificar, de forma quantitativa, os incrementos de ganho em precisão (acurácia) que a adição de mais um sensor proporciona à solução em MS WIM.

CAPÍTULO 2 – BASES PARA PROJETO E ANÁLISE DE CONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS MS WIM



2 BASES PARA PROJETO E ANÁLISE DE CONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS MS WIM

2.1 Introdução

É importante que o conjunto de sensores que forma a estrutura WIM de múltiplos sensores seja projetado para ser acurado para o maior intervalo possível de veículos (frequências) e velocidades.

No presente capítulo é apresentado o desenvolvimento teórico que serve de base para a ferramenta de software (Excel) que foi implementada visando prover subsídios para dimensionamento e análise de projetos e das configurações de sistemas WIM com múltiplos sensores, isto é, número de sensores e espaçamentos entre sensores adjacentes, levando em consideração as velocidades do tráfego e os tipos de veículos, caracterizados pelas frequências de oscilação das suspensões.

Ainda nesse capítulo serão apresentadas tabelas mestras para diversas configurações, parametrizadas por velocidades, por frequências das suspensões e por número de sensores.

2.2 Desenvolvimento Teórico

Para valores dados de Δ e f é possível se estimar o intervalo de velocidades V do veículo dentro do qual o sistema irá operar na “região plana” da curva do Coeficiente de Variação de Erro (CVE), onde a acurácia é, consistentemente, relativamente alta ($\eta \geq 0,5$).

Da observação da equação para o erro adimensional, os zeros em $\hat{\varepsilon}(n, \delta)$ ocorrem quando se tem:

$$\delta_k = \frac{k}{n} \quad \text{com } k = 1, 2, 3, \dots (n-1)$$

Sem perda de generalidade serão ignorados os valores de $k > n$, uma vez que esses valores representam grandes espaçamentos entre sensores adjacentes (geralmente impraticáveis) e são valores de espaçamento que conduzem a

configurações para as quais as forças da roda sobre o pavimento são amostradas em frequências bem abaixo da frequência de Nyquist (isto é, menor que 2 amostras por ciclo).

Usando as equações que descrevem o modelo da força de impacto das rodas sobre o pavimento e assumindo os espaçamentos Δ e a frequência de oscilação da suspensão f fixos, os zeros ocorrem em velocidades V_k dadas por:

$$V_k = \frac{\bar{f}n\Delta}{k} \quad k = 1, 2, 3, \dots (n-1),$$

onde se fez uso da variável (fixa no presente desenvolvimento) \bar{f} que é a frequência da componente espectral dominante em $S_{pp}(\omega)$.

A região plana da curva do Coeficiente de Variação de Erro (CVE) será inteiramente controlada pelo primeiro e último zeros, isto é, considerando-se o “envelope” do erro $\hat{\varepsilon}$ do erro RMS observa-se que a região plana se situa entre os valores de espaçamento adimensional relativos a $k = 1$ e $k = n-1$.

Assim, a princípio, as velocidades máxima e mínima para as quais o sistema WIM será razoavelmente e comparativamente mais acurado (operação na “região plana”), são dadas respectivamente por:

$$V_{\max} = V_1 = \bar{f}n\Delta$$

e por:

$$V_{\min} = V_{n-1} = \frac{\bar{f}n\Delta}{(n-1)}$$

onde V_{\max} e V_{\min} são as velocidades máxima e mínima para operação com menor erro relativo.

Portanto, um bom procedimento de projeto seria escolher Δ usando-se a velocidade média dos veículos utilizando a rodovia, ou seja, velocidade que correspondesse à média de V_{\min} e V_{\max} .

É lógico que um procedimento melhor pode ser o de atribuir peso às velocidades dos veículos e assumir esses pesos como sendo diretamente proporcionais aos volumes de tráfego de veículos em uma dada faixa de velocidade na rodovia em relação ao volume total de tráfego. Em outras

palavras, assumir a média ponderada das velocidades com a ponderação refletindo o volume relativo de tráfego esperado para cada faixa de velocidade.

De qualquer forma, se atendo ao valor médio simples para efeitos práticos, ao invés da média ponderada com peso proporcional ao volume de tráfego, ter-se-ia ao combinar as equações para V_{max} e V_{min} fornecidas acima:

$$\Delta_{projeto} = \frac{2(n-1)\bar{V}}{fn^2}$$

onde \bar{V} = velocidade média estimada entre V_{max} e V_{min} (em m/s)

Raciocínio análogo pode ser feito em relação às frequências de oscilação das suspensões e o espaçamentos.

Substituindo o espaçamento Δ pelo espaçamento de projeto $\Delta_{projeto}$ nas equações para V_{max} e V_{min} , obtém-se:

$$V_{max} = \frac{2(n-1)\bar{V}}{n}$$

e

$$V_{min} = \frac{2\bar{V}}{n}$$

Portanto, o intervalo de frequências sobre o qual o conjunto de n sensores WIM será relativamente acurado, para uma dada velocidade média \bar{V} dos veículos, pode ser encontrado rearranjando a equação para os espaçamentos em função das velocidades máxima e mínima, fornecendo o seguinte intervalo limite para as frequências:

$$f_{min} = \frac{\bar{V}}{n\Delta}$$

e

$$f_{max} = \frac{(n-1)\bar{V}}{n\Delta}$$

onde o intervalo está parametrizado em função da velocidade média e do valor do espaçamento entre sensores adjacentes.



Se Δ for substituído pela equação de $\Delta_{projeto}$, então as equações acima fornecem:

$$f_{\min} = \frac{n\bar{f}}{2(n-1)}$$

e

$$f_{\max} = \frac{n\bar{f}}{2}$$

onde desta feita o limite está parametrizado em função da frequência da componente espectral dominante em $S_{pp}(\omega)$, mas para o espaçamento definido pelo $\Delta_{projeto}$.

2.3 Tabelas e Resultados para Projeto

São apresentadas, neste tópico, tabelas e resultados, de pronto uso, que permitem o projeto (geometria) de uma configuração de múltiplos sensores tendo como parâmetros o número de sensores e a velocidade média.

As tabelas e gráficos de análise foram gerados pela ferramenta de software desenvolvida em Excel, e que se constitui em elemento integrante dos produtos do projeto em tela.

Para cada par dado pelo número de sensores e de velocidade média a tabela apresenta o espaçamento (“ótimo”) entre os sensores.

Modo contínuo, para cada par dado pelo número de sensores e de velocidade média, acrescido do espaçamento “ótimo”, as tabelas fornecem ainda as velocidades mínima e máxima para aquele número de sensores e espaçamento, bem como os valores das frequências mínima e máxima, também para o correspondente número de sensores, velocidade e espaçamento, que levam a configuração a um erro de estimativa de peso estático pequeno (região plana da curva do Coeficiente de Variação do Erro (CVE), isto é, região plana do “envelope” do erro RMS).

As Tabelas de 1 a 7 apresentam os indicadores descritos para cada frequência de suspensão dominante, variando de 1 a 4 Hz, em passos de 0,5 Hz.



Valores menores, intermediários e maiores de quaisquer das grandezas podem ser inferidos por meio de interpolação ou extrapolação de forma linear tendo em vista que todas as equações e relações que foram usadas são lineares.

Tabela 1 – Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 1 hz

Frequencia da suspensão: 1,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
50,00	3,00	66,67	33,33	6,17	1,50	0,75
50,00	4,00	75,00	25,00	5,21	2,00	0,67
50,00	5,00	80,00	20,00	4,44	2,50	0,63
50,00	6,00	83,33	16,67	3,86	3,00	0,60
50,00	7,00	85,71	14,29	3,40	3,50	0,58
50,00	8,00	87,50	12,50	3,04	4,00	0,57
50,00	9,00	88,89	11,11	2,74	4,50	0,56
50,00	10,00	90,00	10,00	2,50	5,00	0,56
60,00	3,00	80,00	40,00	7,41	1,50	0,75
60,00	4,00	90,00	30,00	6,25	2,00	0,67
60,00	5,00	96,00	24,00	5,33	2,50	0,63
60,00	6,00	100,00	20,00	4,63	3,00	0,60
60,00	7,00	102,86	17,14	4,08	3,50	0,58
60,00	8,00	105,00	15,00	3,65	4,00	0,57
60,00	9,00	106,67	13,33	3,29	4,50	0,56
60,00	10,00	108,00	12,00	3,00	5,00	0,56
70,00	3,00	93,33	46,67	8,64	1,50	0,75
70,00	4,00	105,00	35,00	7,29	2,00	0,67
70,00	5,00	112,00	28,00	6,22	2,50	0,63
70,00	6,00	116,67	23,33	5,40	3,00	0,60
70,00	7,00	120,00	20,00	4,76	3,50	0,58
70,00	8,00	122,50	17,50	4,25	4,00	0,57
70,00	9,00	124,44	15,56	3,84	4,50	0,56
70,00	10,00	126,00	14,00	3,50	5,00	0,56
80,00	3,00	106,67	53,33	9,88	1,50	0,75
80,00	4,00	120,00	40,00	8,33	2,00	0,67



Frequencia da suspensão: 1,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
80,00	5,00	128,00	32,00	7,11	2,50	0,63
80,00	6,00	133,33	26,67	6,17	3,00	0,60
80,00	7,00	137,14	22,86	5,44	3,50	0,58
80,00	8,00	140,00	20,00	4,86	4,00	0,57
80,00	9,00	142,22	17,78	4,39	4,50	0,56
80,00	10,00	144,00	16,00	4,00	5,00	0,56
90,00	3,00	120,00	60,00	11,11	1,50	0,75
90,00	4,00	135,00	45,00	9,38	2,00	0,67
90,00	5,00	144,00	36,00	8,00	2,50	0,63
90,00	6,00	150,00	30,00	6,94	3,00	0,60
90,00	7,00	154,29	25,71	6,12	3,50	0,58
90,00	8,00	157,50	22,50	5,47	4,00	0,57
90,00	9,00	160,00	20,00	4,94	4,50	0,56
90,00	10,00	162,00	18,00	4,50	5,00	0,56

Tabela 2 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 1,5 hz

Frequencia da suspensão: 1,50 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
50,00	3,00	66,67	33,33	4,12	2,25	1,13
50,00	4,00	75,00	25,00	3,47	3,00	1,00
50,00	5,00	80,00	20,00	2,96	3,75	0,94
50,00	6,00	83,33	16,67	2,57	4,50	0,90
50,00	7,00	85,71	14,29	2,27	5,25	0,88
50,00	8,00	87,50	12,50	2,03	6,00	0,86
50,00	9,00	88,89	11,11	1,83	6,75	0,84
50,00	10,00	90,00	10,00	1,67	7,50	0,83
60,00	3,00	80,00	40,00	4,94	2,25	1,13
60,00	4,00	90,00	30,00	4,17	3,00	1,00
60,00	5,00	96,00	24,00	3,56	3,75	0,94



Frequencia da suspensão: 1,50 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
60,00	6,00	100,00	20,00	3,09	4,50	0,90
60,00	7,00	102,86	17,14	2,72	5,25	0,88
60,00	8,00	105,00	15,00	2,43	6,00	0,86
60,00	9,00	106,67	13,33	2,19	6,75	0,84
60,00	10,00	108,00	12,00	2,00	7,50	0,83
70,00	3,00	93,33	46,67	5,76	2,25	1,13
70,00	4,00	105,00	35,00	4,86	3,00	1,00
70,00	5,00	112,00	28,00	4,15	3,75	0,94
70,00	6,00	116,67	23,33	3,60	4,50	0,90
70,00	7,00	120,00	20,00	3,17	5,25	0,88
70,00	8,00	122,50	17,50	2,84	6,00	0,86
70,00	9,00	124,44	15,56	2,56	6,75	0,84
70,00	10,00	126,00	14,00	2,33	7,50	0,83
80,00	3,00	106,67	53,33	6,58	2,25	1,13
80,00	4,00	120,00	40,00	5,56	3,00	1,00
80,00	5,00	128,00	32,00	4,74	3,75	0,94
80,00	6,00	133,33	26,67	4,12	4,50	0,90
80,00	7,00	137,14	22,86	3,63	5,25	0,88
80,00	8,00	140,00	20,00	3,24	6,00	0,86
80,00	9,00	142,22	17,78	2,93	6,75	0,84
80,00	10,00	144,00	16,00	2,67	7,50	0,83
90,00	3,00	120,00	60,00	7,41	2,25	1,13
90,00	4,00	135,00	45,00	6,25	3,00	1,00
90,00	5,00	144,00	36,00	5,33	3,75	0,94
90,00	6,00	150,00	30,00	4,63	4,50	0,90
90,00	7,00	154,29	25,71	4,08	5,25	0,88
90,00	8,00	157,50	22,50	3,65	6,00	0,86
90,00	9,00	160,00	20,00	3,29	6,75	0,84
90,00	10,00	162,00	18,00	3,00	7,50	0,83



Tabela 3 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 2 Hz

Frequencia da suspensão: 2,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
50,00	3,00	66,67	33,33	3,09	3,00	1,50
50,00	4,00	75,00	25,00	2,60	4,00	1,33
50,00	5,00	80,00	20,00	2,22	5,00	1,25
50,00	6,00	83,33	16,67	1,93	6,00	1,20
50,00	7,00	85,71	14,29	1,70	7,00	1,17
50,00	8,00	87,50	12,50	1,52	8,00	1,14
50,00	9,00	88,89	11,11	1,37	9,00	1,13
50,00	10,00	90,00	10,00	1,25	10,00	1,11
60,00	3,00	80,00	40,00	3,70	3,00	1,50
60,00	4,00	90,00	30,00	3,13	4,00	1,33
60,00	5,00	96,00	24,00	2,67	5,00	1,25
60,00	6,00	100,00	20,00	2,31	6,00	1,20
60,00	7,00	102,86	17,14	2,04	7,00	1,17
60,00	8,00	105,00	15,00	1,82	8,00	1,14
60,00	9,00	106,67	13,33	1,65	9,00	1,13
60,00	10,00	108,00	12,00	1,50	10,00	1,11
70,00	3,00	93,33	46,67	4,32	3,00	1,50
70,00	4,00	105,00	35,00	3,65	4,00	1,33
70,00	5,00	112,00	28,00	3,11	5,00	1,25
70,00	6,00	116,67	23,33	2,70	6,00	1,20
70,00	7,00	120,00	20,00	2,38	7,00	1,17
70,00	8,00	122,50	17,50	2,13	8,00	1,14
70,00	9,00	124,44	15,56	1,92	9,00	1,13
70,00	10,00	126,00	14,00	1,75	10,00	1,11
80,00	3,00	106,67	53,33	4,94	3,00	1,50
80,00	4,00	120,00	40,00	4,17	4,00	1,33
80,00	5,00	128,00	32,00	3,56	5,00	1,25
80,00	6,00	133,33	26,67	3,09	6,00	1,20
80,00	7,00	137,14	22,86	2,72	7,00	1,17
80,00	8,00	140,00	20,00	2,43	8,00	1,14
80,00	9,00	142,22	17,78	2,19	9,00	1,13



Frequencia da suspensão: 2,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
80,00	10,00	144,00	16,00	2,00	10,00	1,11
90,00	3,00	120,00	60,00	5,56	3,00	1,50
90,00	4,00	135,00	45,00	4,69	4,00	1,33
90,00	5,00	144,00	36,00	4,00	5,00	1,25
90,00	6,00	150,00	30,00	3,47	6,00	1,20
90,00	7,00	154,29	25,71	3,06	7,00	1,17
90,00	8,00	157,50	22,50	2,73	8,00	1,14
90,00	9,00	160,00	20,00	2,47	9,00	1,13
90,00	10,00	162,00	18,00	2,25	10,00	1,11

Tabela 4 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 2,5 Hz

Frequencia da suspensão: 2,50 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
50,00	3,00	66,67	33,33	2,47	3,75	1,88
50,00	4,00	75,00	25,00	2,08	5,00	1,67
50,00	5,00	80,00	20,00	1,78	6,25	1,56
50,00	6,00	83,33	16,67	1,54	7,50	1,50
50,00	7,00	85,71	14,29	1,36	8,75	1,46
50,00	8,00	87,50	12,50	1,22	10,00	1,43
50,00	9,00	88,89	11,11	1,10	11,25	1,41
50,00	10,00	90,00	10,00	1,00	12,50	1,39
60,00	3,00	80,00	40,00	2,96	3,75	1,88
60,00	4,00	90,00	30,00	2,50	5,00	1,67
60,00	5,00	96,00	24,00	2,13	6,25	1,56
60,00	6,00	100,00	20,00	1,85	7,50	1,50
60,00	7,00	102,86	17,14	1,63	8,75	1,46
60,00	8,00	105,00	15,00	1,46	10,00	1,43
60,00	9,00	106,67	13,33	1,32	11,25	1,41
60,00	10,00	108,00	12,00	1,20	12,50	1,39
70,00	3,00	93,33	46,67	3,46	3,75	1,88



Frequencia da suspensão: 2,50 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
70,00	4,00	105,00	35,00	2,92	5,00	1,67
70,00	5,00	112,00	28,00	2,49	6,25	1,56
70,00	6,00	116,67	23,33	2,16	7,50	1,50
70,00	7,00	120,00	20,00	1,90	8,75	1,46
70,00	8,00	122,50	17,50	1,70	10,00	1,43
70,00	9,00	124,44	15,56	1,54	11,25	1,41
70,00	10,00	126,00	14,00	1,40	12,50	1,39
80,00	3,00	106,67	53,33	3,95	3,75	1,88
80,00	4,00	120,00	40,00	3,33	5,00	1,67
80,00	5,00	128,00	32,00	2,84	6,25	1,56
80,00	6,00	133,33	26,67	2,47	7,50	1,50
80,00	7,00	137,14	22,86	2,18	8,75	1,46
80,00	8,00	140,00	20,00	1,94	10,00	1,43
80,00	9,00	142,22	17,78	1,76	11,25	1,41
80,00	10,00	144,00	16,00	1,60	12,50	1,39
90,00	3,00	120,00	60,00	4,44	3,75	1,88
90,00	4,00	135,00	45,00	3,75	5,00	1,67
90,00	5,00	144,00	36,00	3,20	6,25	1,56
90,00	6,00	150,00	30,00	2,78	7,50	1,50
90,00	7,00	154,29	25,71	2,45	8,75	1,46
90,00	8,00	157,50	22,50	2,19	10,00	1,43
90,00	9,00	160,00	20,00	1,98	11,25	1,41
90,00	10,00	162,00	18,00	1,80	12,50	1,39

Tabela 5 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 3 Hz

Frequencia da suspensão: 3,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
50,00	3,00	66,67	33,33	2,06	4,50	2,25
50,00	4,00	75,00	25,00	1,74	6,00	2,00
50,00	5,00	80,00	20,00	1,48	7,50	1,88



Frequencia da suspensão: 3,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
50,00	6,00	83,33	16,67	1,29	9,00	1,80
50,00	7,00	85,71	14,29	1,13	10,50	1,75
50,00	8,00	87,50	12,50	1,01	12,00	1,71
50,00	9,00	88,89	11,11	0,91	13,50	1,69
50,00	10,00	90,00	10,00	0,83	15,00	1,67
60,00	3,00	80,00	40,00	2,47	4,50	2,25
60,00	4,00	90,00	30,00	2,08	6,00	2,00
60,00	5,00	96,00	24,00	1,78	7,50	1,88
60,00	6,00	100,00	20,00	1,54	9,00	1,80
60,00	7,00	102,86	17,14	1,36	10,50	1,75
60,00	8,00	105,00	15,00	1,22	12,00	1,71
60,00	9,00	106,67	13,33	1,10	13,50	1,69
60,00	10,00	108,00	12,00	1,00	15,00	1,67
70,00	3,00	93,33	46,67	2,88	4,50	2,25
70,00	4,00	105,00	35,00	2,43	6,00	2,00
70,00	5,00	112,00	28,00	2,07	7,50	1,88
70,00	6,00	116,67	23,33	1,80	9,00	1,80
70,00	7,00	120,00	20,00	1,59	10,50	1,75
70,00	8,00	122,50	17,50	1,42	12,00	1,71
70,00	9,00	124,44	15,56	1,28	13,50	1,69
70,00	10,00	126,00	14,00	1,17	15,00	1,67
80,00	3,00	106,67	53,33	3,29	4,50	2,25
80,00	4,00	120,00	40,00	2,78	6,00	2,00
80,00	5,00	128,00	32,00	2,37	7,50	1,88
80,00	6,00	133,33	26,67	2,06	9,00	1,80
80,00	7,00	137,14	22,86	1,81	10,50	1,75
80,00	8,00	140,00	20,00	1,62	12,00	1,71
80,00	9,00	142,22	17,78	1,46	13,50	1,69
80,00	10,00	144,00	16,00	1,33	15,00	1,67
90,00	3,00	120,00	60,00	3,70	4,50	2,25
90,00	4,00	135,00	45,00	3,13	6,00	2,00
90,00	5,00	144,00	36,00	2,67	7,50	1,88
90,00	6,00	150,00	30,00	2,31	9,00	1,80



Frequencia da suspensão: 3,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
90,00	7,00	154,29	25,71	2,04	10,50	1,75
90,00	8,00	157,50	22,50	1,82	12,00	1,71
90,00	9,00	160,00	20,00	1,65	13,50	1,69
90,00	10,00	162,00	18,00	1,50	15,00	1,67

Tabela 6 Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 3,5 Hz

Frequencia da suspensão: 3,50 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
50,00	3,00	66,67	33,33	1,76	5,25	2,63
50,00	4,00	75,00	25,00	1,49	7,00	2,33
50,00	5,00	80,00	20,00	1,27	8,75	2,19
50,00	6,00	83,33	16,67	1,10	10,50	2,10
50,00	7,00	85,71	14,29	0,97	12,25	2,04
50,00	8,00	87,50	12,50	0,87	14,00	2,00
50,00	9,00	88,89	11,11	0,78	15,75	1,97
50,00	10,00	90,00	10,00	0,71	17,50	1,94
60,00	3,00	80,00	40,00	2,12	5,25	2,63
60,00	4,00	90,00	30,00	1,79	7,00	2,33
60,00	5,00	96,00	24,00	1,52	8,75	2,19
60,00	6,00	100,00	20,00	1,32	10,50	2,10
60,00	7,00	102,86	17,14	1,17	12,25	2,04
60,00	8,00	105,00	15,00	1,04	14,00	2,00
60,00	9,00	106,67	13,33	0,94	15,75	1,97
60,00	10,00	108,00	12,00	0,86	17,50	1,94
70,00	3,00	93,33	46,67	2,47	5,25	2,63
70,00	4,00	105,00	35,00	2,08	7,00	2,33
70,00	5,00	112,00	28,00	1,78	8,75	2,19
70,00	6,00	116,67	23,33	1,54	10,50	2,10
70,00	7,00	120,00	20,00	1,36	12,25	2,04
70,00	8,00	122,50	17,50	1,22	14,00	2,00



Frequencia da suspensão: 3,50 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
70,00	9,00	124,44	15,56	1,10	15,75	1,97
70,00	10,00	126,00	14,00	1,00	17,50	1,94
80,00	3,00	106,67	53,33	2,82	5,25	2,63
80,00	4,00	120,00	40,00	2,38	7,00	2,33
80,00	5,00	128,00	32,00	2,03	8,75	2,19
80,00	6,00	133,33	26,67	1,76	10,50	2,10
80,00	7,00	137,14	22,86	1,55	12,25	2,04
80,00	8,00	140,00	20,00	1,39	14,00	2,00
80,00	9,00	142,22	17,78	1,25	15,75	1,97
80,00	10,00	144,00	16,00	1,14	17,50	1,94
90,00	3,00	120,00	60,00	3,17	5,25	2,63
90,00	4,00	135,00	45,00	2,68	7,00	2,33
90,00	5,00	144,00	36,00	2,29	8,75	2,19
90,00	6,00	150,00	30,00	1,98	10,50	2,10
90,00	7,00	154,29	25,71	1,75	12,25	2,04
90,00	8,00	157,50	22,50	1,56	14,00	2,00
90,00	9,00	160,00	20,00	1,41	15,75	1,97
90,00	10,00	162,00	18,00	1,29	17,50	1,94

Tabela 7 - Dados para a configuração de sensores e análise de sensibilidade para frequência da suspensão de 4,0 Hz

Frequencia da suspensão: 4,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
50,00	3,00	66,67	33,33	1,54	6,00	3,00
50,00	4,00	75,00	25,00	1,30	8,00	2,67
50,00	5,00	80,00	20,00	1,11	10,00	2,50
50,00	6,00	83,33	16,67	0,96	12,00	2,40
50,00	7,00	85,71	14,29	0,85	14,00	2,33
50,00	8,00	87,50	12,50	0,76	16,00	2,29
50,00	9,00	88,89	11,11	0,69	18,00	2,25
50,00	10,00	90,00	10,00	0,63	20,00	2,22



Frequencia da suspensão: 4,00 Hz						
Velocidade média (km/h)	Número de sensores	Velocidade máxima (km/h)	Velocidade mínima (km/h)	Espaçamento de projeto (m)	Frequência máxima (Hz)	Frequência mínima (Hz)
60,00	3,00	80,00	40,00	1,85	6,00	3,00
60,00	4,00	90,00	30,00	1,56	8,00	2,67
60,00	5,00	96,00	24,00	1,33	10,00	2,50
60,00	6,00	100,00	20,00	1,16	12,00	2,40
60,00	7,00	102,86	17,14	1,02	14,00	2,33
60,00	8,00	105,00	15,00	0,91	16,00	2,29
60,00	9,00	106,67	13,33	0,82	18,00	2,25
60,00	10,00	108,00	12,00	0,75	20,00	2,22
70,00	3,00	93,33	46,67	2,16	6,00	3,00
70,00	4,00	105,00	35,00	1,82	8,00	2,67
70,00	5,00	112,00	28,00	1,56	10,00	2,50
70,00	6,00	116,67	23,33	1,35	12,00	2,40
70,00	7,00	120,00	20,00	1,19	14,00	2,33
70,00	8,00	122,50	17,50	1,06	16,00	2,29
70,00	9,00	124,44	15,56	0,96	18,00	2,25
70,00	10,00	126,00	14,00	0,88	20,00	2,22
80,00	3,00	106,67	53,33	2,47	6,00	3,00
80,00	4,00	120,00	40,00	2,08	8,00	2,67
80,00	5,00	128,00	32,00	1,78	10,00	2,50
80,00	6,00	133,33	26,67	1,54	12,00	2,40
80,00	7,00	137,14	22,86	1,36	14,00	2,33
80,00	8,00	140,00	20,00	1,22	16,00	2,29
80,00	9,00	142,22	17,78	1,10	18,00	2,25
80,00	10,00	144,00	16,00	1,00	20,00	2,22
90,00	3,00	120,00	60,00	2,78	6,00	3,00
90,00	4,00	135,00	45,00	2,34	8,00	2,67
90,00	5,00	144,00	36,00	2,00	10,00	2,50
90,00	6,00	150,00	30,00	1,74	12,00	2,40
90,00	7,00	154,29	25,71	1,53	14,00	2,33
90,00	8,00	157,50	22,50	1,37	16,00	2,29
90,00	9,00	160,00	20,00	1,23	18,00	2,25
90,00	10,00	162,00	18,00	1,13	20,00	2,22

A título de exemplo, nas Figuras 6 a 8 são apresentados gráficos que podem ser gerados pela ferramenta de projeto, permitindo uma análise da sensibilidade em velocidade e frequência (máxima e mínima) tendo como base o número de sensores, do espaçamento e da velocidade média para uma dada frequência dominante.

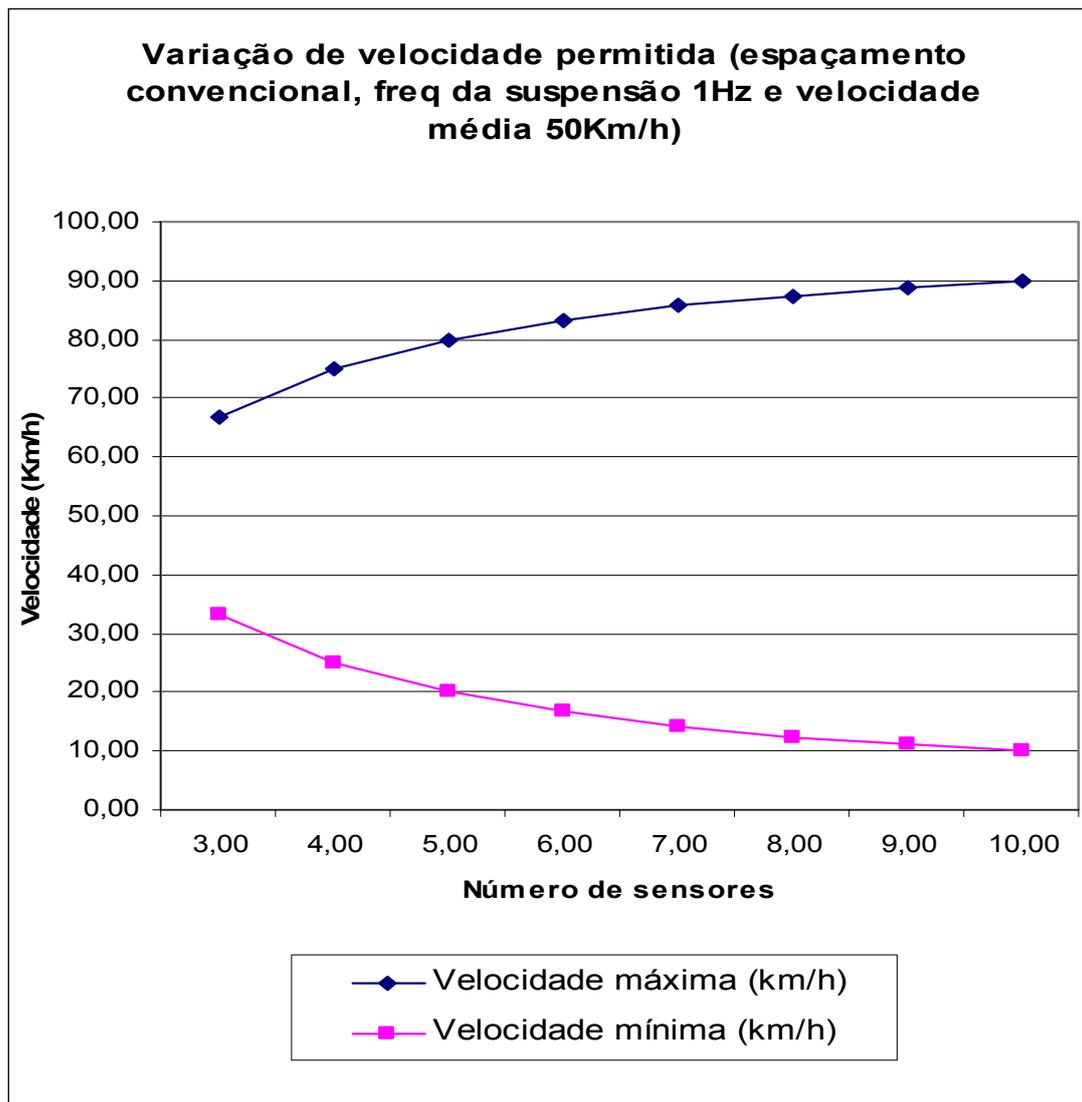


Figura 6 - Variação de velocidade permitida para espaçamento convencional “ótimo”, frequência da suspensão 1Hz e velocidade média 50Km/h

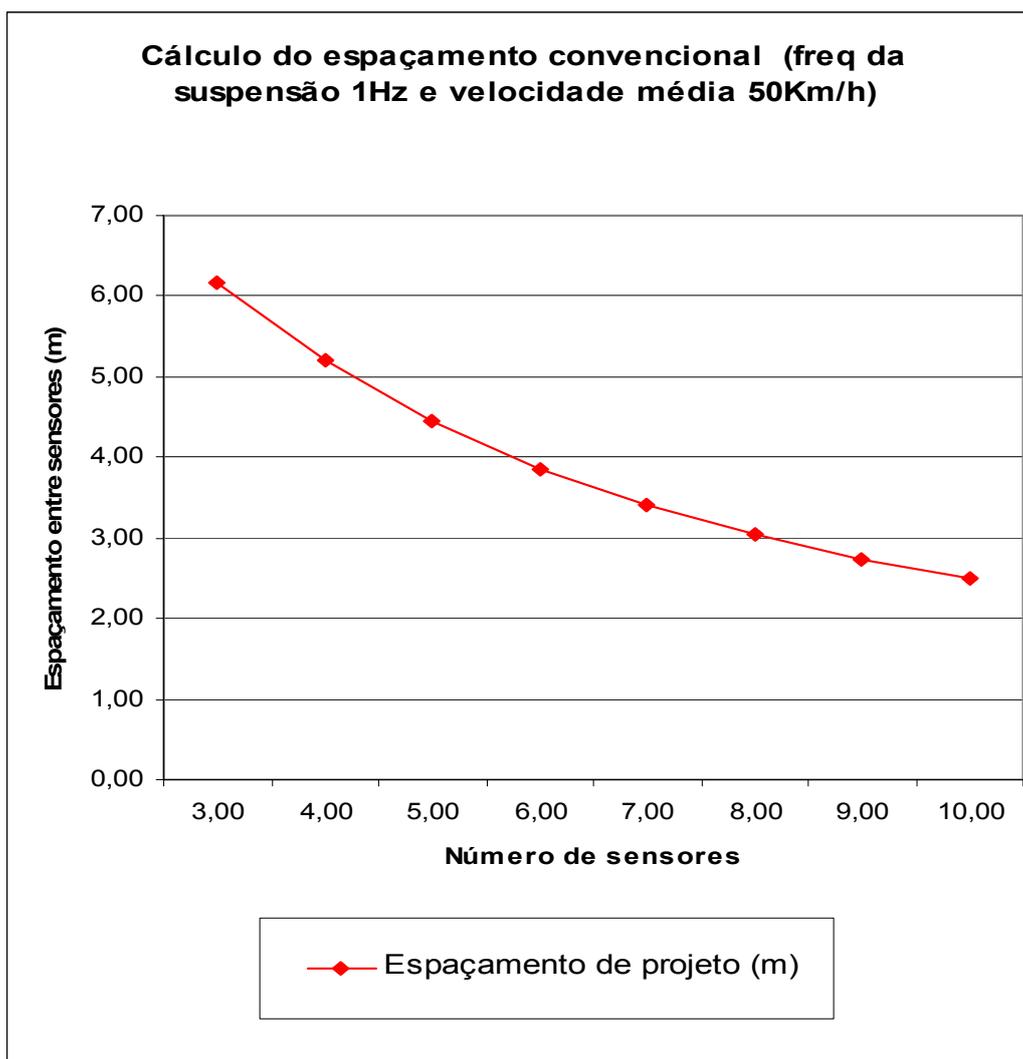


Figura 7 - Variação do espaçamento convencional “ótimo” para frequência da suspensão 1Hz e velocidade média 50Km/h

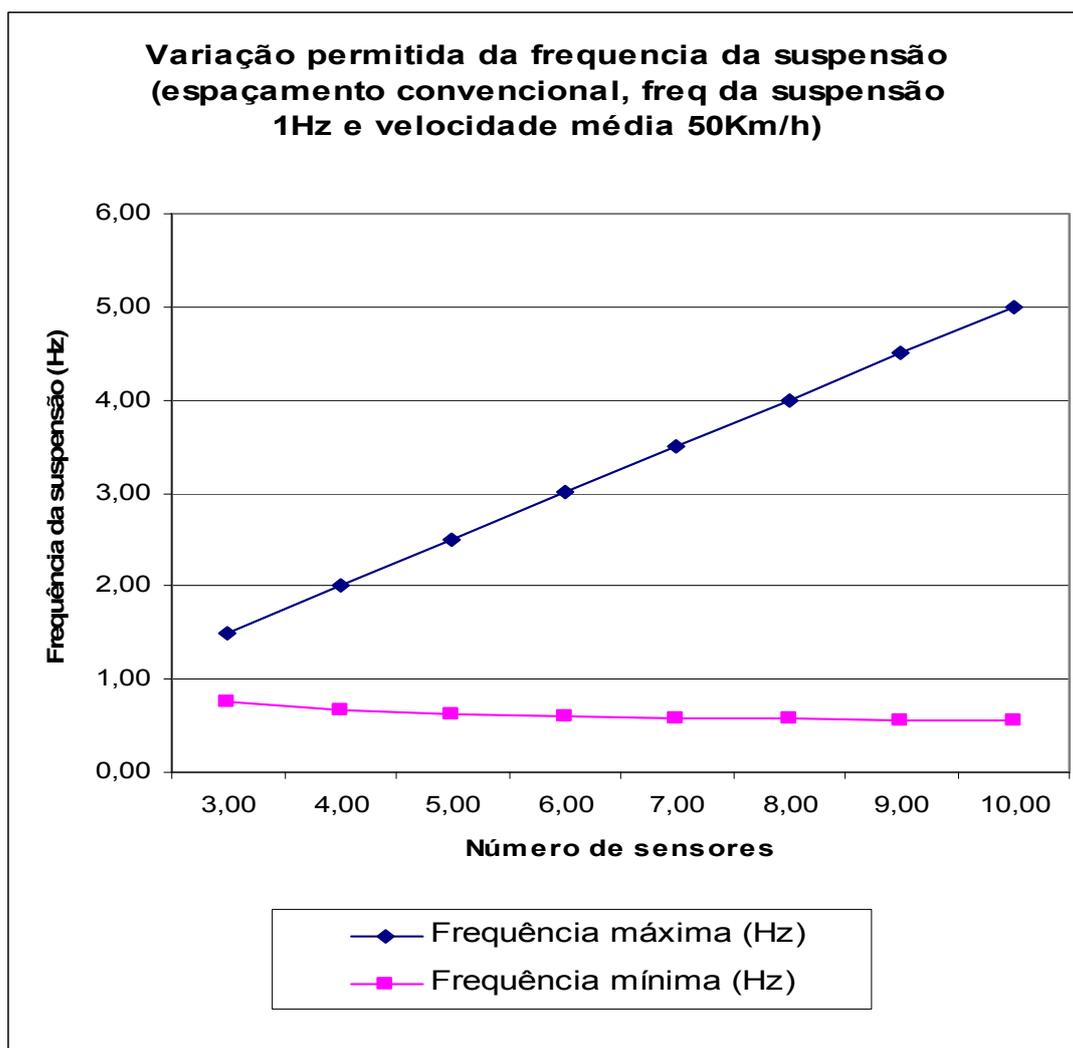


Figura 8 - Variação permitida da frequência da suspensão para espaçamento convencional "ótimo", frequência da suspensão 1Hz e velocidade média 50Km/h



**CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO FUNCIONAL DO
SISTEMA WIM**



3 DESCRIÇÃO FUNCIONAL DO SISTEMA WIM

3.1 Introdução

Antes da descrição funcional propriamente do sistema WIM é de fundamental importância apresentar o diagrama esquemático previsto para a instalação do sistema WIM na pista de teste de Araranguá. De fato, o sistema WIM de teste é composto por 3 tipos de sistemas WIM com múltiplos sensores e eletrônica de processamento diferentes. Um dos sistemas possui sensores piezelétricos de quartzo (Kistler e parceiro nacional PAT), no outro os sensores também são piezelétricos, mas de cerâmica, e no terceiro os sensores piezelétricos são de polímero.

Não obstante as diferenças de tecnologias e da eletrônica de processamento, o processo básico de aquisição e pré-tratamento dos dados é feito de forma similar, sendo diferentes somente nas temporizações, formatos de dados, forma de armazenamento e na forma (frequência de amostragem e processo de integração) como executam o que se convém chamar de pré-processamento.

Na Figura 9 é apresentado o diagrama esquemático da disposição dos sensores e da eletrônica de aquisição e de pré-processamento. Não se encontram no diagrama as câmeras para registro das fotos traseiras e laterais para identificação dos veículos (duas por sistema, com exceção do terceiro sistema que utilizará o registro fotográfico dos sistemas anteriormente instalados). Cada conjunto de duas câmeras está conectado à eletrônica de pré-processamento do respectivo conjunto de sensores, e é essa eletrônica que é responsável pelos sinais de “trigger” e de controle do sistema de registro fotográfico do experimento, da forma como será visto posteriormente.

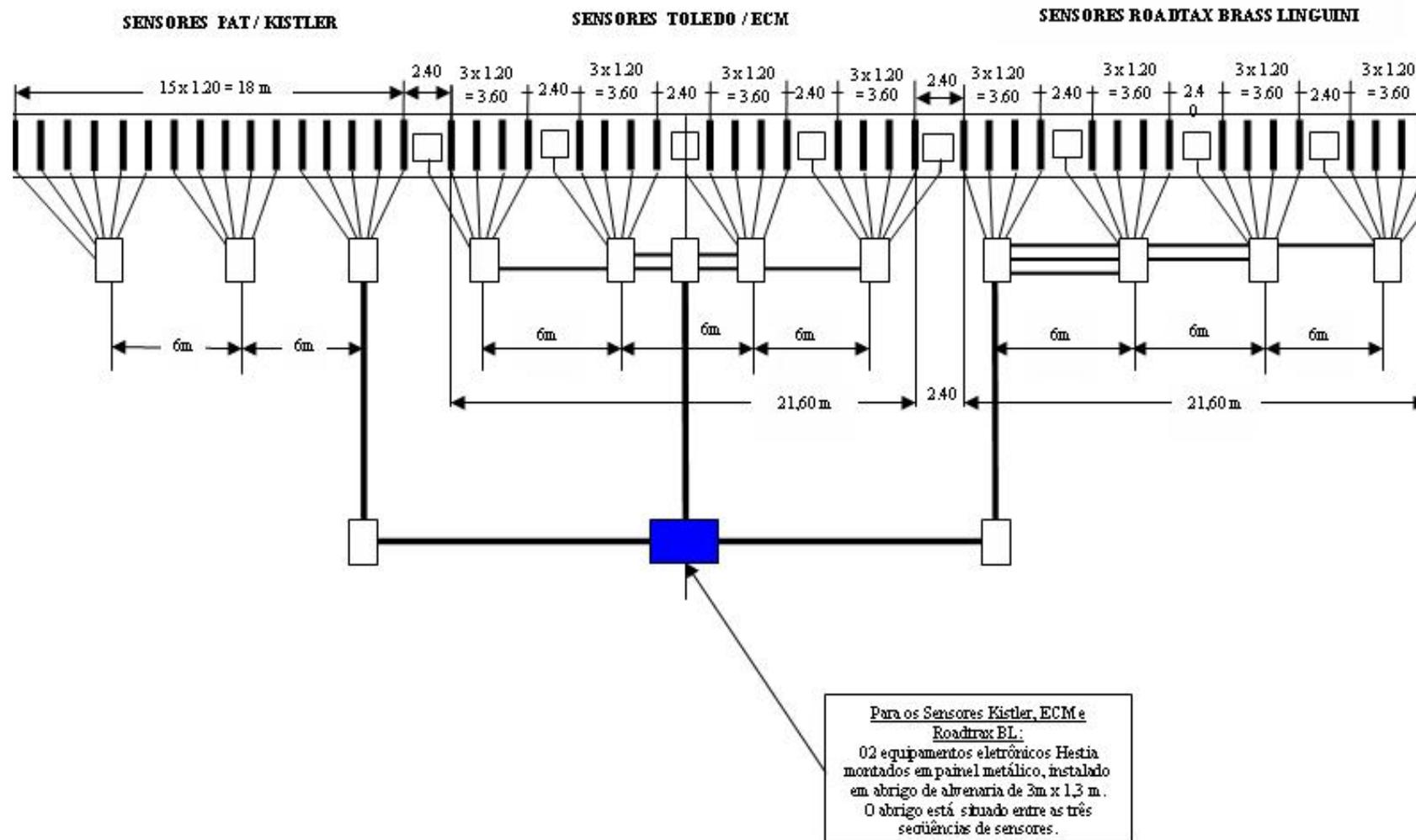


Figura 9 – Diagrama esquemático do experimento



3.2 Detalhamento Funcional do Sistema WIM

A descrição funcional do sistema WIM será feita tomando-se como base as Figuras 10 e 11 apresentadas. Para efeitos didáticos e de simplicidade tem-se que, de forma genérica, as funcionalidades de cada um dos sensores e dos elementos de pré-processamento de um determinado conjunto WIM é replicada para todos os demais sensores de forma genérica e, de modo contínuo, estendido para os outros sistemas.

Procurou-se apresentar textos bem explicativos já nos diagramas apresentados: os textos espelham as funções de forma clara visando dar ao leitor, somente ao verificar as figuras, a idéia detalhada da funcionalidade de cada um dos blocos, bem como da inter-relação entre os diversos blocos funcionais.

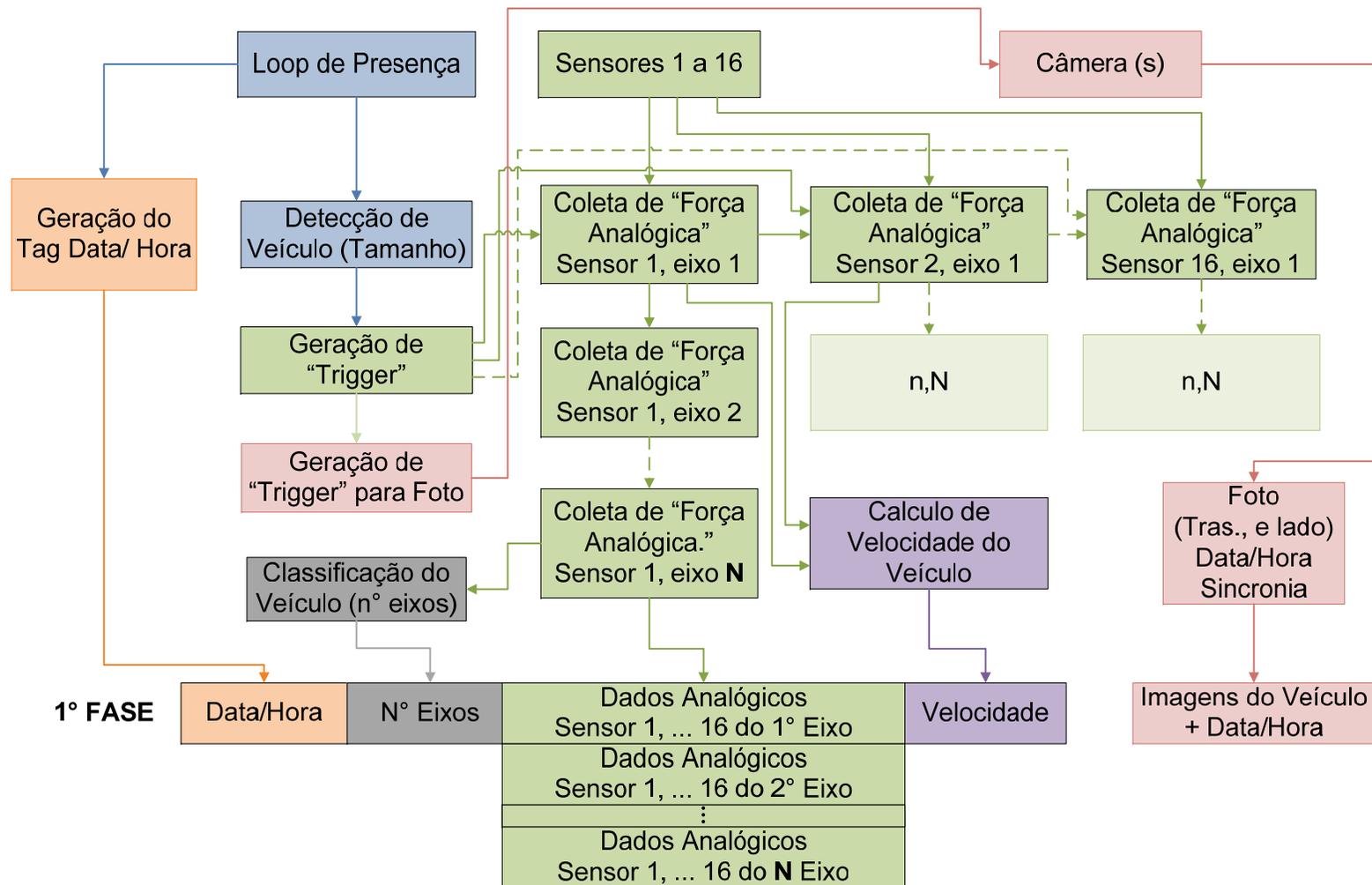


Figura 10 – Diagrama detalhado funcional do sistema WIM completo (1ª parte – estrutura de aquisição de dados e de sinais de controle – trigger)

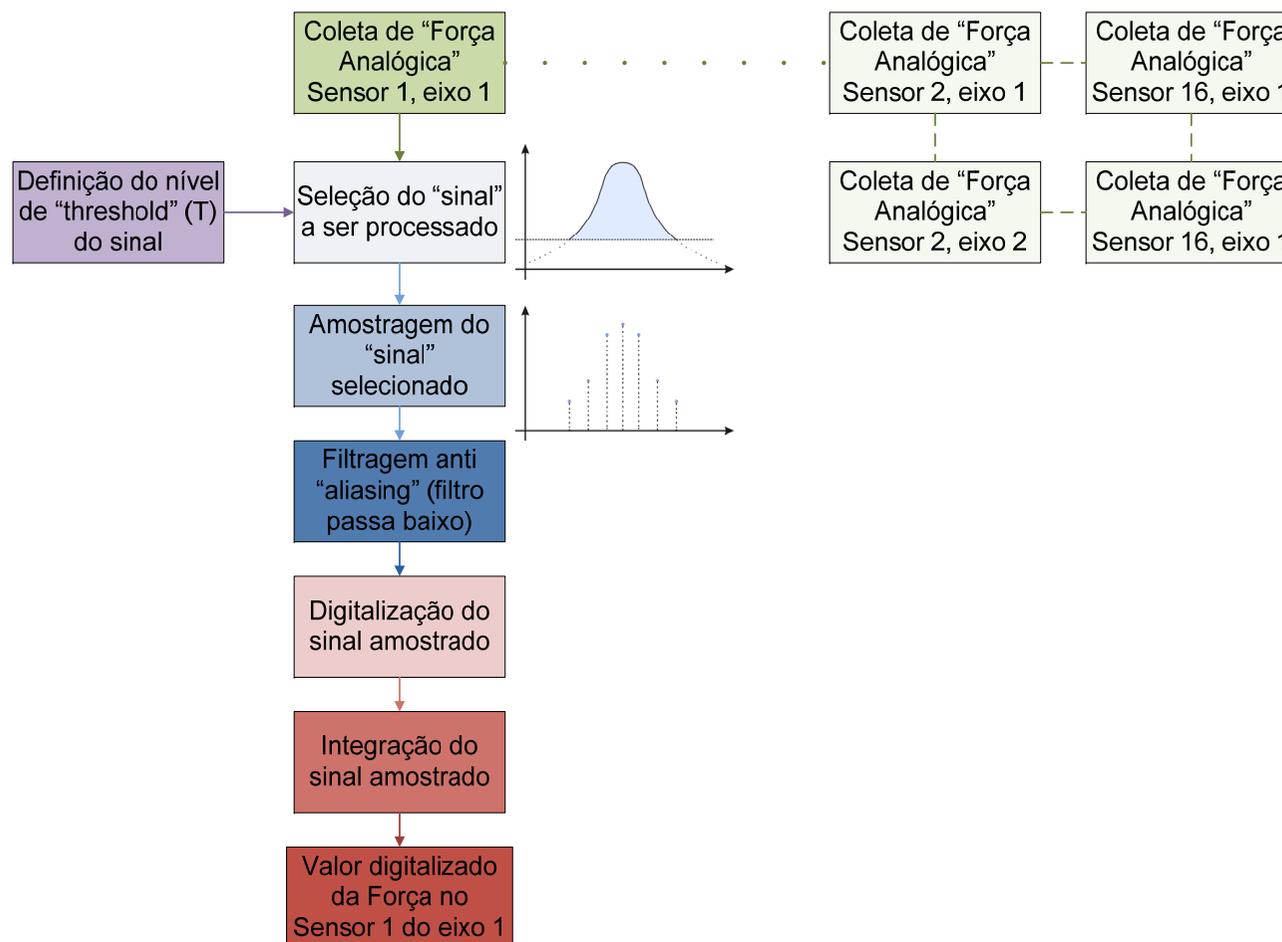


Figura 11 – Diagrama detalhado funcional do sistema WIM completo (2ª parte – pre-processamento da força analógica em valor digitalizado da força)



Na Figura 10 tem-se o diagrama do sistema enfocando o subsistema de aquisição de dados, o subsistema de trigger e de sincronismo e o subsistema de registro fotográfico culminando num quadro de dados, com o formato de conteúdo explicitado, chamado de 1ª fase, qual seja a fase de aquisição e de condicionamento.

O Loop de Presença é responsável pelo sincronismo e pela geração dos sinais de trigger e de controle do processo. Nota-se que o Loop de Presença alimenta tanto o disparo da aquisição por todos os sensores da força dos pneus no pavimento bem como do disparo das câmeras fotográficas (na figura só um bloco é representado para significar as 2 câmeras). A partir da detecção do veículo, isto é, do veículo entrando no Loop de Presença, o sistema gera sinais que habilitam os sensores, os sinais que vão habilitar as câmeras e a geração do identificar das medidas e dos registros sendo efetuados (“Tag Data/Hora”). Como os instantes para habilitação das aquisições de dados pelos sensores e de acionamento das câmeras são distintos, são mostrados dois blocos distintos na Figura 10.

De posse do sinal de trigger de aquisição, os sensores geram os sinais de força analógica como resposta à passagem de cada “eixo” por sobre cada um dos sensores e isto é indicado pelos blocos de Coleta de Força Analógica, obviamente identificados por eixo e por sensor.

O trigger para a câmera gera o acionamento desta que registra, conforme mostrado no Bloco Foto e Data/Hora, a foto devidamente identificada pelo identificador do sistema que é o parâmetro Data/Hora.

Após a detecção de todos os eixos e registro das forças analógicas em todos os sensores (o sistema de Loop de Presença é o responsável por garantir isso), é gerada a classificação do veículo (número de eixos).

Essa primeira fase de aquisição, identificação do evento pelo tag Data/Hora e de registro de fotos, é gerado um conjunto de dados cujo conteúdo geral contém:

- ⊙ Data/Hora
- ⊙ Número de eixos
- ⊙ Dados Analógicos dos Sensores de 1 a 16 relativo ao eixo 1
- ⊙ Dados Analógicos dos Sensores de 1 a 16 relativo ao eixo 2
- ⊙ (idem ao eixo 3



- ⊙ (idem ao eixo n, com n variando desde 1 até o último eixo sentido pelos sensores)
- ⊙ Velocidade do veículo (passagem entre dois sensores ou passagem entre dois loops de presença – caso do sistema Hestia)

Já a Figura 11 ilustra o processo de pré-processamento da força analógica, a integração dos dados após a amostragem do sinal dos sensores, e por fim a digitalização do dado de força em dado para uso futuro desta feita no formato digital.

Com relação à Figura 11, após a coleta do dado analógico, tem-se o processo de seleção do intervalo de sinal a ser processado que é levado a termo por um seletor de nível (“threshold”), nível esse pré-estabelecido, e que pode variar de sensor para sensor dentro de um mesmo sistema.

Após a seleção do trecho de interesse do sinal, esse sinal é amostrado em taxas de frequência da ordem de 5 a 10 kHz, o que supera em muito o critério de Nyquist para o processo em tela.

Tendo em vista o processo de amostragem, existe a necessidade de filtragem do sinal amostrado visando reduzir (se não eliminar) os efeitos de “aliasing” inerentes a qualquer processo de amostragem e da janela de amostragem (usualmente componentes de alta frequência devido aos tamanhos das janelas de amostragem usadas). Isto é demonstrado na Figura 11 por meio do bloco de Filtragem anti “aliasing” e Filtro Passa Baixo.

Após a filtragem o sinal é quantificado em número de bits tais que sejam obtidas resoluções adequadas (da ordem de menos de 0,5% do valor máximo do sinal da máxima força esperada), com um “range” dinâmico que subtenda da menor à maior força esperada, ocasionando portanto um sinal digital isento de saturação e com erro de quantificação condizente com as acurácias envolvidas (limitadas pelo ruído dos sensores).

Modo contínuo, é conduzido o processo de integração digital pelo bloco de Integração do Sinal Amostrado, conduzindo então ao valor propriamente dito da força de um eixo sobre um sensor, resultado esse representado no Bloco Valor Digitalizado da Força do Eixo 1 no Sensor 1.



Óbvio que o processo descrito se repete para todos os eixos e para todos os sensores, sendo usual o pré-processamento de cada um dos pares sensor-eixo ocorrer em paralelo ou quase em paralelo.

Essa segunda fase de aquisição e pré-processamento, e de posse de alguns dos dados gerados na primeira fase, permite a geração dos dados de saída do processo de aquisição e pré-processamento que é formado por:

- ⊙ Data/Hora (1ª. fase)
- ⊙ Número de eixos (1ª. fase)
- ⊙ Valor Digitalizado da Força no sensor 1 relativo ao eixo 1
- ⊙ Valor Digitalizado da Força no sensor 2 relativo ao eixo 1
- ⊙ (idem ao sensor 3)
- ⊙ (idem ao sensor n, com n variando desde 1 até o último sensor)
- ⊙ Valor Digitalizado da Força no sensor 1 relativo ao eixo 2
- ⊙ Valor Digitalizado da Força no sensor 2 relativo ao eixo 2
- ⊙ (idem ao eixo 3)
- ⊙ (idem ao eixo n, com n variando desde 1 até o último eixo)
- ⊙ Velocidade do veículo (1ª. fase)

CAPÍTULO 4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLACK T F (1992) **Arkansas' Experience Piezo-Electric Cable Weigh In Motion Systems in Asphaltic Concrete Pavements**, Proceedings National Traffic Data Acquisition Conference, de 1992, pp 57-67.
- CEBON D, WINKLER C B (1991), **Multiple-sensor weigh-in-motion: theory and experiments**, Transportation Research Record No. 1311, Pavement Management: Data Collection, Analysis, and Storage, pp 71-78.
- CEBON D, WINKLER CB (1991), **A study of road damage due to dynamic wheel loads using a load measuring mat**, Report SHPR-ID/UFR-91-518, Strategic Highway Research Program, National Research Council, USA.
- CEBON, D (1999), **Multiple sensor Weigh-in-Motion, Weigh-in-motion of Road Vehicles**, Proceedings of the Final Symposium WAVE, ed. B. Jacob, Hermes, Paris, 177-194.
- DOLCEMASCOLO, V (1999), **Performance of Multiple-Sensor WIM by Testing, Weigh-in-motion of Road Vehicles**, Proceedings of the Final Symposium WAVE, ed. B. Jacob, Hermes, Paris, 195-202.
- DOLCEMASCOLO, V., LABRY, D, JACOB, B (2002), **Accuracy comparison of two multiple-sensor WIM static weight estimation algorithms**, 3rd International Conference on Weigh-In-Motion, May, Orlando, Florida.
- GILLESPIE T, KARAMIHAS SM (1992), **The Feasibility of Multiple-Sensor Weighing for Increased Accuracy of WIM**, Proceedings National Traffic Data Acquisition Conference, de 1992, pp 81-91.
- GONZALES A, PAPAGIANNAKIS A T, O'BRIEN E J (2003), **Evaluation of an artificial neural network technique applied to multiple-sensor weigh-in-motion systems**, Transportation research record (Transp. res. rec.), no 1855 , pp. 151-159.
- GUO L, TANG Y, YU J, LI L, CHEN X, AND LIU R (2004), **Weigh-in-Motion System Design with Piezoelectric Sensor**, Earth & Space 2004, Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments, Ninth Biennial Conference of the Aerospace Division, Editors Malla & Maji, Houston, Texas, pp 45-67
- KWON TM (2007), **Signal Processing of Piezoelectric Weight-in-Motion Systems**, Proceedings Circuits, Signals, and Systems, Vol 4, 2007, pp 84-119.
- LABRY, D., DOLCEMASCOLO, V., JACOB, B. (2004), **MS-WIM systems optimisation method**, Proceedings of the 8th International Symposium on Heavy Vehicles Weights and Dimensions, March 15-18, Misty Hills, South Africa, pp 45-55.
- O'BRIEN J E (2003), **Evaluation of artificial neural network technique applied to Multiple-Sensor Weigh-in-Motion Systems**, Proceedings of the Annual 2003 TRB Meeting, pp 123- 134.



SAINTE-MARIE, J, ARGOUL, P, JACOB, B, DOLCEMASCOLO, V (1998), **Multiple-sensor WIM using reconstruction algorithms of the dynamic axles loads**, Pre-Proceedings of 2nd European Conference on Weigh-in-motion of Road Vehicles, eds. E.J. O'Brien & B. Jacob, Lisbon, Sept 14-16, European Commission, Luxembourg, pp 109-117.

STERGIOULAS LK, CEBON D., MACLEOD MD. (1998), **Enhancing multiple-sensor WIM systems**, Pre-Proceedings of 2nd European Conference on Weigh-in-motion of Road Vehicles, eds. E.J. O'Brien & B. Jacob, Lisboa, Set 14-16, European Commission, Luxembourg, pp 119-127.

