

MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MICHELLE SORAIA DE CARVALHO

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE SUSPENSÕES PASSIVAS DE VEÍCULOS  
MILITARES EMPREGANDO UM MODELO DE  $\frac{1}{2}$  CARRO

Rio de Janeiro

2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

MICHELLE SORAIA DE CARVALHO

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE SUSPENSÕES PASSIVAS DE VEÍCULOS  
MILITARES EMPREGANDO UM MODELO DE ½ CARRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Aldélio Bueno Caldeira – Maj  
Co-Orientador: Ricardo Teixeira da Costa Neto - Maj

Rio de Janeiro

2015

c2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro - RJ      CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

XXXX Carvalho, Michelle Soraia de

Estimativa de suspensões passivas de veículos militares empregando um modelo de ½ carro/ Michelle Soraia de Carvalho - Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.

XX f. : il., graf., tab. : - cm.

Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, 2015.

1. Formação.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

MICHELLE SORAIA DE CARVALHO

**ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE SUSPENSÕES PASSIVAS DE VEÍCULOS  
MILITARES EMPREGANDO UM MODELO DE ½ CARRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Maj. Aldélio Bueno Caldeira - D.C

Co-orientador: Maj. Ricardo Teixeira da Costa Neto - D. C.

Aprovada em 18 de dezembro de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Maj. Aldélio Bueno Caldeira – D. C. do IME

---

Maj. Ricardo Teixeira da Costa Neto – D. C. do IME

---

Cel. André Louzada Moreira – D.C. da Escola Naval

Rio de Janeiro

2015

Primeiramente a Deus, que me proporcionou mais uma oportunidade de avançar em meus estudos. A Santíssima Virgem, minha mãe, que também acompanha todos os meus passos.

Aos meus pais, José Carlos de Carvalho e Carmem Lúcia de Carvalho, que me compreenderam em todos os momentos de dificuldade.

E a todos aqueles que se dedicaram a minha instrução e acreditaram na minha capacidade em desenvolver este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e a Santíssima Virgem, que sempre estão presentes em minha vida. Aos meus pais, que me apoiaram de maneira incondicional e me incentivaram a prosseguir em meus estudos.

A todos os professores que já estiveram presentes em minha vida, por quem tenho respeito e admiração.

Aos professores da Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, que com tanta dedicação e paciência me instruíram e me ajudaram na realização deste trabalho.

Aos meus amigos que estiveram ao meu lado durante todo o curso, me animando e auxiliando o meu desenvolvimento profissional.

Ao meu orientador Aldélio Bueno Caldeira e ao meu co-orientador Ricardo Teixeira da Costa Neto pelo apoio, paciência e dedicação.

E a CAPES, pelo apoio financeiro, o que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS.....	12
1	INTRODUÇÃO ..... 16
1.1	FUNDAMENTOS ..... 16
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO ..... 18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 19
2.1	FUNDAMENTOS ..... 19
2.1.1	SUSPENSÃO DE UM VEÍCULO ..... 19
2.1.2	PROBLEMA INVERSO..... 20
2.1.3	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO..... 22
2.1.3.1	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICOS ..... 23
2.1.3.2	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICOS ..... 23
2.1.3.3	RANDOM RESTRICTED WINDOW – R2W ..... 25
2.1.3.4	PARTICLE SWARM OPTIMIZATION – PSO ..... 27
2.2	MODELAGEM, OTIMIZAÇÃO E ESTIMATIVA DE PARÂMETROS APLICADOS À SISTEMAS DE SUSPENSÕES VEICULARES ..... 29
2.2.1	MODELAGEM DA DINÂMICA VEICULAR ..... 29
2.2.2	OTIMIZAÇÃO DA SUSPENSÃO VEICULAR ..... 32
2.2.3	ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DA SUSPENSÃO VEICULAR ..... 33
2.3	CONCLUSÃO ..... 35
3	O PROBLEMA DIRETO ..... 36
3.1	O MODELO FÍSICO ..... 36
3.2	O MODELO DE ½ CARRO..... 38
3.3	CONCLUSÃO ..... 40

4	VERIFICAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL.....	42
4.1	VERIFICAÇÃO DO MODELO DE ½ CARRO COM 2EIXOS.....	42
4.2	VERIFICAÇÃO DO MODELO DE ½ CARRO COM 5 EIXOS.....	46
4.3	CONCLUSÃO .....	59
5	ESTIMATIVA DE PARÂMETROS: COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO E RIGIDEZ DA SUSPENSÃO .....	61
5.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	63
5.2	VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.....	66
5.3	VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROBLEMA INVERSO .....	72
5.4	CONCLUSÃO .....	75
6	ESTIMATIVA DE PARÂMETROS: IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS NOS AMORTECEDORES .....	77
6.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	78
6.2	VERIFICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO .....	85
6.3	VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROBLEMA INVERSO .....	86
6.3.1	ANÁLISE DO RUÍDO E DA DEGRADAÇÃO DOS AMORTECEDORES – 1kHz 86	
6.3.2	ANÁLISE DA TAXA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E DA DEGRADAÇÃO DOS AMORTECEDORES – 40Hz.....	96
6.4	CONCLUSÃO .....	99
7	CONCLUSÃO .....	102
8	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	106

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Sistema de suspensão: (a) ativa e (b) semiativa (Fonte: Adaptado de WONG, 2001).....	20
Figura 2.2 – Relação entre o problema direto e inverso.....	21
Figura 2.3 – Representação esquemática do comportamento evolucionar a procura de melhores alimentos.....	24
Figura 2.4 –Diagrama esquemático do R2W .....	26
Figura 2.5 – Representação esquemática do R2W (Fonte: Adaptado de BIHAIN <i>et al</i> , 2012) .....	26
Figura 2.6 – Representação vetorial do cálculo da nova posição e velocidade de cada partícula (Fonte: Adaptado de HASSAN <i>et al</i> , 2004).....	28
Figura 2.7 – Diagrama esquemático do método de otimização PSO (Fonte: COLAÇO <i>et al</i> , 2006).....	29
Figura 3.1 – Modelo de ½ carro com 5 eixos (Fonte: Adaptado de ATA, 2014) .....	36
Figura 4.1 – Modelo de ½ carro com 2 eixos (Fonte: Adaptado de ATA, 2014) .....	44
Figura 4.2 – Aceleração vertical do CG do chassi .....	44
Figura 4.3 – Aceleração angular do chassi.....	45
Figura 4.4 – Deslocamento da roda dianteira.....	45
Figura 4.5 – Deslocamento da roda traseira .....	46
Figura 4.6 – Modelo de ½ carro com 5 eixos (ATA, 2014) (Fonte: ATA, 2014).....	47
Figura 4.7 – Aceleração vertical do CG do chassi (v=10km/he w=0,5m).....	49
Figura 4.8 – Aceleração angular do chassi(v=10km/he w=0,5m) .....	50
Figura 4.9 – Aceleração vertical do CG do chassi(v=40km/he w=0,5m) .....	50
Figura 4.10 – Aceleração angular do chassi (v=40km/he w=0,5m) .....	51
Figura 4.11 – Aceleração vertical do CG do chassi (v=60km/he w=0,5m).....	51
Figura 4.12 – Aceleração angular do chassi (v=60km/he w=0,5m) .....	52
Figura 4.13 – Aceleração vertical do CG do chassi (v=10km/h e w=2,5m).....	53
Figura 4.14 – Aceleração angular do chassi (v=10km/he w=2,5m) .....	54
Figura 4.15– Aceleração vertical do CG do chassi (v=40km/he w=2,5m) .....	54
Figura 4.16 – Aceleração angular do chassi (v=40km/he w=2,5m) .....	55
Figura 4.17 – Aceleração vertical do CG do chassi (v=60km/he w=2,5m).....	55

Figura 4.18 – Aceleração angular do chassi (v=60km/he w=2,5m) .....	56
Figura 4.19–Aceleração vertical do CG do chassi (v=10km/he w=5m).....	56
Figura 4.20 – Aceleração angular do chassi (v=10km/he w=5m) .....	57
Figura 4.21 – Aceleração vertical do CG do chassi (v=40km/he w=5m).....	57
Figura 4.22 – Aceleração angular do chassi (v=40km/he w=5m) .....	58
Figura 4.23 – Aceleração vertical do CG do chassi (v=60km/he w=5m).....	58
Figura 4.24 – Aceleração angular do chassi (v=60km/h e w=5m) .....	59
Figura 5.1 – Xij - Aceleração vertical do CG do Chassi.....	65
Figura 5.2 – Yij - Aceleração angular do chassi .....	65
Figura 5.3– Aceleração vertical do CG do chassi – R2W.....	69
Figura 5.4 – Aceleração angular do chassi – R2W .....	69
Figura 5.5– Aceleração vertical do CG do chassi – PSO.....	71
Figura 5.6 – Aceleração angular do chassi – PSO .....	72
Figura 5.7 – Histórico de convergência com níveis de ruído iguais a 1%, 5% e 10% - PSO ..	74
Figura 5.8 – Histórico de convergência com níveis de ruído iguais a 1%, 5% e 10% - R2W.	75
Figura 6.1 – Xij - Aceleração vertical do CG do chassi (sem degradação) .....	79
Figura 6.2 – Xij - Aceleração vertical do CG do chassi (10% de degradação).....	80
Figura 6.3 – Xij - Aceleração vertical do CG do chassi (50% de degradação).....	80
Figura 6.4 – Xij - Aceleração vertical do CG do chassi (90% de degradação).....	81
Figura 6.5 – Yij - Aceleração angular do chassi (sem degradação).....	82
Figura 6.6 – Yij - Aceleração angular do chassi (10% de degradação) .....	82
Figura 6.7 – Yij - Aceleração angular do chassi (50% de degradação) .....	83
Figura 6.8 – Yij - Aceleração angular do chassi (90% de degradação) .....	83
Figura 6.9 – Histórico de convergência – C <sub>3</sub> com 50% de degradação - PSO.....	90
Figura 6.10 – Histórico de convergência – C <sub>4</sub> com 50% de degradação - R2W .....	91
Figura 6.11 – Histórico de convergência – C <sub>5</sub> com 50% de degradação - R2W .....	91
Figura 6.12 – Histórico de convergência – amortecedores sem degradação - R2W.....	92
Figura 6.13 – Histórico de convergência – C <sub>2</sub> com 50% de degradação e 10% de ruído .....	93
Figura 6.14 – Histórico de convergência – C <sub>3</sub> com 50% de degradação e 10% de ruído .....	94
Figura 6.15 – Histórico de convergência – C <sub>2</sub> com 50% de degradação e 10% de ruído- 40Hz e 1kHz .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados no modelo de ½ carro .....	37
Tabela 4.1–Valores dos parâmetros do modelo de ½ carro com 2 eixos.....	43
Tabela 4.2–Valores dos parâmetros do terreno (ATA, 2014).....	47
Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros do modelo de ½ carro com 5 eixos - chassi.....	48
Tabela 4.4 – Valores dos parâmetros do modelo de ½ carro com 5 eixos – conjunto suspensão-roda. ....	48
Tabela 5.1 – Referências para veículos sobre rodas e os valores para cada parâmetro .....	62
Tabela 5.2 – Referências para veículos sobre lagartas e os valores para cada parâmetro.....	63
Tabela 5.3 – Limites para cada parâmetro a ser otimizado nos métodos PSO e R2W .....	63
Tabela 5.4 – Resultados estimados empregando o R2W .....	68
Tabela 5.5 – Avaliação da convergência do PSO com diferentes valores de $\beta$ e $\alpha$ .....	70
Tabela 5.6 – Resultados estimados empregando o PSO ( $\alpha=0,5$ e $\beta=1,0$ ) .....	70
Tabela 5.7 – Resultados para as estimativas dos parâmetros com a introdução dos ruídos nas medidas pseudoexperimentais - PSO .....	73
Tabela 5.8 – Resultados para as estimativas dos parâmetros com a introdução dos ruídos nas medidas pseudoexperimentais - R2W .....	73
Tabela 6.1 – Melhores resultados empregando R2W e PSO .....	85
Tabela 6.2 – Estimativas dos 5 coeficientes de amortecimento (PSO, 1kHz) .....	88
Tabela 6.3 – Estimativas dos 5 coeficientes de amortecimento (R2W, 1kHz) .....	89
Tabela 6.4 – Estimativas dos 5 coeficientes de amortecimento (PSO, 40Hz) .....	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

- C- Matriz de amortecimento  
 $C_i$ - Coeficiente de amortecimento da suspensão (Ns/m)  
 $\ddot{D}_i$  - Medidas pseudoexperimentais  
F- Função objetivo  
 $F_w$ - Força de contato entre os pneus e o solo  
f- Frequência (Hz)  
h- Altura do obstáculo (m)  
 $I_y$ - Momento de inércia do chassi em relação ao centro de gravidade (kg.m<sup>2</sup>)  
 $J_{ij}$ - Coeficiente de sensibilidade  
K-Matriz de rigidez  
 $K_i$ - Constante de rigidez da suspensão (N/m)  
 $K_{wi}$ - Constante de rigidez dos pneus (N/m)  
k- Geração de indivíduos  
 $l_i$ - Posição de cada roda no referencial inercial (m)  
M - Matriz de inércia  
m- Massa do chassi (kg)  
 $m_{wi}$ - Massa dos pneus (kg)  
N- Número máximo de partículas em cada geração  
 $N_{\text{gerações}}$ - Número máximo de gerações  
n- Número de pontos de medidas  
 $n_{\text{eixos}}$ - Número de eixos  
 $P_j$ - Parâmetros a serem estimados  
R- Número randômico entre zero e um  
 $r_1, r_2$ - Números randômicos entre zero e um  
t- Tempo de simulação(s)  
 $V_i^{k+1}$  - Velocidade da partícula na nova iteração adimensional  
 $V_i^k$  - Velocidade da partícula na iteração anterior adimensional  
v- Velocidade do veículo (km/h)  
 $X_{ij}$ - Coeficiente de sensibilidade modificado para a aceleração do chassi (m/s<sup>2</sup>)

$x_i^{k+1}$  - Posição da partícula na nova iteração  
 $x_i^k$  - Posição da partícula na iteração interior  
 $w$  - Largura do obstáculo (m)  
 $w_r$  - Frequência Angular (Hz)  
 $\Upsilon_{ij}$  - Coeficiente de sensibilidade modificado para a aceleração angular do chassi (rad/s<sup>2</sup>)  
 $Z$  - Movimento vertical do chassi (m)  
 $Z_{wi}$  - Movimento vertical dos pneus (m)  
 $Z_{ri}$  - Excitação de entrada para cada roda (m)  
 $\ddot{Z}$  - Medidas da aceleração do chassi (m/s<sup>2</sup>)  
 $\ddot{Z}_{exp}$  - Medidas da aceleração pseudoexperimental do chassi (m/s<sup>2</sup>)  
 $\ddot{Z}_{ref}$  - Medidas da aceleração do chassi obtida por ATA (2014) (m/s<sup>2</sup>)  
 $z$  - Vetor de deslocamentos  
 $\alpha$  - Parâmetro Inercial adimensional  
 $\beta$  - Parâmetro de Aprendizagem adimensional  
 $\gamma_i^k$  - Melhor posição das partículas durante todas as suas gerações  
 $\gamma_g$  - Melhor posição de todas as partículas durante todas as gerações  
 $\Delta\ddot{Z}_{adm}$  - Discrepância adimensional da aceleração do chassi  
 $\Delta\ddot{\theta}_{adm}$  - Discrepância adimensional da aceleração angular do chassi  
 $\delta$  - Fator de restrição que define o tamanho da janela de busca  
 $\zeta_i$  - Indivíduo de cada população  
 $\zeta_i^*$  - Melhor indivíduo de cada população  
 $\zeta_{iH}$  - Limite superior da janela de busca para todos os indivíduos de uma população  
 $\zeta_{iL}$  - Limite inferior da janela de busca para todos os indivíduos de uma população  
 $\theta$  - Movimento angular de arfagem do chassi (rad)  
 $\ddot{\theta}$  - Medidas da aceleração angular do chassi obtidas por partículas geradas (rad/s<sup>2</sup>)  
 $\ddot{\theta}_{exp}$  - Medidas da aceleração angular pseudoexperimental do chassi (rad/s<sup>2</sup>)  
 $\ddot{\theta}_{ref}$  - Medidas da aceleração angular do chassi obtida por ATA (2014) (rad/s<sup>2</sup>)  
 $\tau_i$  - Intervalo de tempo entre cada roda (s)

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo estimar os parâmetros das suspensões passivas de um veículo militar sobre lagartas com cinco eixos. A viabilidade da estimativa de parâmetros é analisada, empregando experimentos simulados.

O problema direto é baseado em um modelo de  $\frac{1}{2}$  carro. Este modelo possui sete equações diferenciais ordinárias, as quais são implementadas em *Scilab*<sup>®</sup> e resolvidas pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem. O modelo permite simulações de veículos sobre rodas e sobre lagartas com diferentes números de eixos, trafegando sobre diferentes terrenos.

A análise de sensibilidade verificou a viabilidade da estimativa simultânea dos parâmetros das suspensões e identificou o melhor intervalo de tempo para a realização das medidas simultâneas da aceleração vertical e de arfagem do chassi a fim de estimar os parâmetros das suspensões.

Os métodos estocásticos evolucionários “*Random Restricted Window*” (R2W) e “*Particle Swarm Optimization*” (PSO) são empregados na solução das estimativas de parâmetros. Os parâmetros empíricos de cada método são selecionados com base nos problemas inversos estudados.

Dois problemas inversos são estudados. O primeiro estima o coeficiente de amortecimento e a rigidez da suspensão, considerando que as suspensões são iguais. O segundo estima os coeficientes de amortecimento de cada suspensão. Este problema objetiva identificar e quantificar falhas nos amortecedores.

Ruídos simulados são introduzidos nas medidas pseudoexperimentais a fim de atenuar o crime inverso e a influência do nível de ruído na estimativa de parâmetros é analisada, bem como a influência da taxa de aquisição de dados experimentais.

Na maioria dos casos estudados, o PSO e o R2W tiveram desempenho equivalente na estimativa de parâmetros. Contudo, em alguns casos, o PSO consumiu menos tempo computacional e minimizou mais a função objetivo.

Como esperado, reduzindo a taxa de aquisição de dados ou aumentando o nível de ruído, a estimativa de parâmetros se tornou mais difícil.

Este trabalho mostrou a viabilidade do experimento proposto para realizar a estimativa de parâmetros da suspensão.

## ABSTRACT

The present work aims to estimate the passive suspension parameters of a tracked military vehicle with five axes. The viability of parameters estimation is analyzed, employing simulated experiments.

The direct problem is based on a half car model. This model has seven ordinary differential equations, which are implemented in *Scilab*<sup>®</sup> and solved by using the 4<sup>th</sup> order Runge-Kutta method. The model allows simulations of wheeled and tracked vehicles with different numbers of axes, traversing different terrains.

The sensitivity analysis has verified the feasibility of simultaneous estimation of the suspensions parameters and has identified the best time intervals for the simultaneous measurements of the chassis bounce and pitch accelerations to the suspensions parameters estimation.

The optimization methods “*Random Restricted Window*” (R2W) and “*Particle Swarm Optimization*” (PSO) are employed in the parameter estimation. The empirical parameters of each method are chosen with basis on the studied inverse problems.

Two inverse problems are studied. The first one estimates the damper coefficient and the suspension stiffness, considering that the suspensions are equals. The second one estimates the damper coefficient of each suspension. This problem aims to identify and to quantify failures in the dampers.

Simulated noise is introduced on the pseudo-experimental measurements to mitigate the inverse crime and the influence of the noise level on the parameters estimation is analyzed, as well as the influence of the experimental data acquisition rate.

In most of studied cases, PSO and R2W have shown equivalent performance on the parameters estimation. However, in some cases, PSO have dispended less computational time and have provided lower values for the objective function.

As expected, reducing the data acquisition rate or increasing the noise level, the parameter estimation becomes more difficult.

The work shows the viability of the proposed experiments to perform the parameter estimation of the suspension.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 FUNDAMENTOS

Veículos militares são veículos especiais por serem submetidos a condições severas de emprego. Estes veículos trafegam em terrenos acidentados onde os veículos convencionais atolam, transportando tropas, armas e outros equipamentos militares. São classificados em: sobre rodas e sobre lagartas, blindados e não blindados, e ainda leve (1 a 2,5 ton), médio (3 a 7 ton) e pesado (acima de 7 ton) (HOHL, 2006).

Veículos sobre lagarta são aqueles em que uma esteira é acoplada às rodas dos veículos terrestres. Com seu uso é possível trafegar em solos deformáveis com mais facilidade, pois a distribuição do peso do veículo ocorre sobre uma superfície maior de contato, diminuindo a pressão do veículo sobre o terreno. Assim, há um aumento na capacidade de tração em terrenos com alto grau de dificuldade de trânsito (LONGMAN, 2009).

Ao trafegar por um terreno, o veículo experimenta vários tipos de vibrações. Elas podem ser sensíveis aos olhos, tato e audição. Quando sensíveis aos olhos e ao tato são denominadas *ride* e ocorrem na faixa definida entre 0 e 25 Hz, enquanto as vibrações sensíveis a audição são denominadas *noise* e pertencem a valores entre 25 e 20.000 Hz (FERREIRA, 2003, GILLESPIE, 1992, TUSSET, 2008).

As vibrações são respostas do veículo devido à ação de forças externas ou internas, que são as entradas de excitação do veículo. Dentre as forças externas se destacam as forças provenientes do terreno, enquanto forças internas são provenientes dos subsistemas do veículo: motor, transmissão, chassi, etc. Desta forma, o chassi do veículo pode responder com movimentos na direção vertical (*bounce*), angular de arfagem (*pitch*), e angular de rolagem (*roll*) (FERREIRA, 2003, WONG, 2001, GILLESPIE, 1992, MARJANEM, 2010).

As vibrações são isoladas por meio da suspensão do veículo. Define-se suspensão como o conjunto dos componentes que conectam as rodas ao chassi do veículo. Suas funções são:

- absorção das irregularidades da piso, garantindo conforto aos passageiros e proporcionando melhor dirigibilidade;
- evitar que os componentes mecânicos sofram grandes desgastes;
- manter os pneus em contato constante com o solo;
- permitir o correto funcionamento do sistema de direção; e

- garantir que as rodas permaneçam em apropriada orientação à superfície sobre a qual o veículo transita, e, para que reajam às forças produzidas pelos pneus durante a aceleração e a frenagem (JUNIOR, 2007, JUNIOR, 2006, ATA, 2014, RODRIGUES, 2005).

Assim, a suspensão do veículo filtra as vibrações impostas pelo terreno, influenciando o conforto e dirigibilidade do veículo (GILLESPIE, 1992, DHIR& SANKAR, 1994, RYU *et al*, 2011, GOGA & KLUCIK, 2012, ATA& OYADIJI, 2014, MEHDIZADEH, 2015). A suspensão leva todo o peso do veículo e oferece um suporte flexível para o veículo no chão (SRIDHAR & SEKAR, 2006). Neste subsistema veicular, a rigidez da suspensão e coeficiente de amortecimento são parâmetros relevantes no projeto e na análise de desempenho da suspensão.

O projeto das suspensões contemporiza o conforto e a dirigibilidade. Quando o foco do projeto é o conforto, prioriza-se a massa suspensa (chassi do veículo) e quando o foco do projeto é a dirigibilidade, priorizam-se as massas não suspensas (eixos e rodas) e a relação destas com o terreno (ATA, 2014, DREHMER, 2012, GILLESPIE, 1992, FERREIRA, 2003). Portanto, há um grande desafio ao projetar uma suspensão, pois, ao melhorar o conforto, prejudica-se a dirigibilidade, e vice-versa (RODRIGUES, 2005).

Em veículos militares sobre lagartas o sistema de suspensão é exposto a condições extremas de funcionamento, e por isso, o conflito entre o conforto e dirigibilidade é maior quando comparado aos veículos sobre rodas (ATA, 2014).

A logística e os custos de manutenção são aspectos relevantes no ciclo de vida de veículos militares, principalmente os sobre lagartas. Estes aspectos motivam o estudo de experimentos de campo a fim de avaliar o desempenho de subsistemas veiculares, permitindo o emprego da manutenção preditiva, pois estes veículos devem permanecer em serviço, longe da base de apoio logístico, o maior tempo possível, sem manutenção de campo e sem retornar para a unidade de manutenção. Destaca-se que principalmente em situações de combate, as consequências associadas a falhas prematuras de componentes de veículos militares podem ser terríveis (WOLDMAN *et al.*, 2015).

Este trabalho propõe e analisa a viabilidade de experimentos de campo para avaliar parâmetros da suspensão de veículos militares. Nestes experimentos, o veículo percorre um terreno acidentado, sendo medidas a aceleração vertical do centro de gravidade do chassi e a

aceleração angular do chassi. A partir destes dados e empregando uma abordagem de problema inverso, o coeficiente de amortecimento e a rigidez da suspensão são estimados.

Em geral, o problema inverso se apóia no problema direto, em um método de otimização e em dados experimentais (ou pseudoexperimentais). No problema inverso ora proposto, o problema direto é constituído por um modelo de 1/2 carro, sendo o problema inverso resolvido por meio dos métodos de otimização “*Particle Swarm Optimization*” (PSO) e “*Random Restricted Window*” (R2W). Além disso, medidas pseudoexperimentais são geradas, permitindo a investigação de diferentes níveis de ruído e de taxas de aquisição de dados.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é organizada em cinco partes principais. A primeira parte é composta pela introdução (Capítulo 1) e pela revisão bibliográfica (Capítulo 2) e visa apresentar os objetivos, a motivação, os fundamentos e as principais referências do trabalho em tela.

A segunda parte, constituída pelos Capítulos 3 e 4, se destina a apresentar o problema direto e a verificar a implementação computacional do modelo de 1/2 carro, bem como sua solução numérica, a qual é confrontada com soluções de referências (GOGA & KLUCIK, 2012, ATA & OYADIJI, 2014).

A terceira parte, composta pelo Capítulo 5, é dedicada à solução do problema inverso de estimativa de parâmetros da rigidez da suspensão e do coeficiente de amortecimento das suspensões de um veículo militar sobre lagartas com cinco eixos. Nesta seção, a análise de sensibilidade dos parâmetros estimados é efetuada, seguida da seleção dos parâmetros empíricos de cada método de otimização, da verificação das rotinas de otimização implementadas e da solução do problema inverso, onde diferentes níveis de ruído experimentais são simulados e sua influência nas estimativas de parâmetros analisada.

A quarta parte, reportada no Capítulo 6, é análoga a terceira parte, porém se destina ao problema inverso de estimativa das cinco constantes de amortecimento das suspensões de um veículo militar sobre lagartas com cinco eixos. Este problema inverso visa identificar e quantificar falhas em um dos cinco amortecedores do veículo. Nesta etapa, também são investigados os efeitos das taxas de aquisição de dados experimentais sobre a solução do problema inverso.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões da dissertação, sendo a quinta parte deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FUNDAMENTOS

#### 2.1.1 SUSPENSÃO DE UM VEÍCULO

“A suspensão de um veículo tem a função básica de isolar as vibrações originadas pela estrada e transmitidas aos passageiros e ao chassi” (TUSSET, 2008).

Os principais componentes do sistema de suspensão são as molas e amortecedores, aos quais se estabelecem as seguintes funções:

- as molas são responsáveis por suportar o peso do veículo e também reagirem ao carregamento imposto pelo terreno. Elas retêm energia devido a sua compressão, impondo, como consequência, uma oscilação ao veículo ao liberá-la ao sistema; e
- os amortecedores dissipam energia, evitando oscilações bruscas e proporcionando a reestabilização do veículo (FERREIRA, 2003, RODRIGUES, 2005, GILLESPIE, 1992, WONG, 2001, IME, 2014 ).

O sistema de suspensão pode ser classificado como passiva, ativa e semiativa. As suspensões passivas são as mais comumente utilizadas devido ao baixo custo, simplicidade de montagem e manutenção. As propriedades das molas e dos amortecedores são inalteráveis, ou seja, não sofrem qualquer tipo de ajuste em tempo real. Em contrapartida, as suspensões ativas e semiativas têm como princípio proporcionar ajustes nesses componentes (ATA, 2014, CAVALHEIRO & AVILA, 2010, WONG, 2001).

A suspensão ativa apresenta um atuador em substituição a mola e o amortecedor, ou ainda, pode ser instalado em paralelo ao sistema de suspensão passiva. Os sensores instalados em diversos pontos do veículo informam ao controlador a magnitude da força que o atuador deve aplicar. Toda essa complexidade acarreta em alto custo de manutenção (ATA, 2014, CAVALHEIRO & AVILA, 2010, WONG, 2001).

Assim, para reduzir essa complexidade e custo de manutenção, porém mantendo o mesmo desempenho, foi desenvolvida a suspensão semiativa. Nesse tipo de sistema, a mola permanece com suas propriedades inalteráveis, tal como no sistema de suspensão passiva. Entretanto, as propriedades do amortecedor podem ser ajustadas de acordo com as condições de operação (ATA, 2014, CAVALHEIRO & AVILA, 2010, WONG, 2001).

Por meio da FIG. 2.1 é possível observar os sistemas de suspensão ativa e semiativa para o modelo de ¼ de carro.

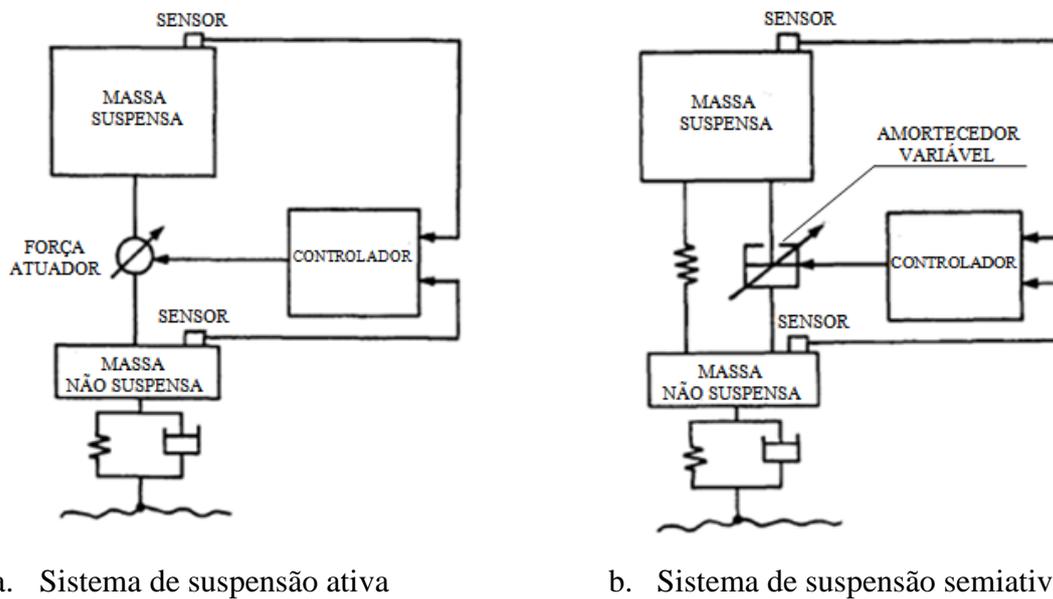


Figura 2.1 – Sistema de suspensão: (a) ativa e (b) semiativa (Fonte: Adaptado de WONG, 2001)

O sistema de suspensão interliga a massa suspensa (chassi) a massa não suspensa (rodas e eixos) e atua como um filtro de oscilações. Os efeitos dessas oscilações sobre o chassi e os eixos podem ser analisados observando a amplitude de resposta às forças atuantes no sistema, os deslocamentos, as velocidades, as acelerações, a deflexão da mola da suspensão (*suspension travel*) e a deflexão dos pneus (FERREIRA, 2003, GILLESPIE, 1992, WONG, 2001).

Assim, a escolha adequada do sistema de suspensão além de minimizar os efeitos sobre o chassi do veículo, também minimiza o desconforto dos passageiros (MARZBANRAD *et al*, 2013, HEISLER, 2002, MEHDIZADEH, 2015).

### 2.1.2 PROBLEMA INVERSO

Os problemas inversos estão presentes em um universo interativo de pesquisa entre simulação computacional e experimental. Ele consiste em determinar a(s) causa(s) de um fenômeno físico a partir dos efeitos observados no mesmo (OZISIK & ORLANDE, 2000, COLAÇO *et al*, 2006, FERREIRA & VENTURINI, 2009, VELHO, 2001).

Para determinar a(s) causa(s) de um fenômeno físico, o problema inverso utiliza o problema direto, como parte integrante da metodologia de solução (OZISIK & ORLANDE, 2000, VELHO, 2001), aliado a métodos de otimização que minimizam os desvios entre os dados experimentais e a solução do problema direto, encontrando assim a solução do problema inverso. Ou seja, na solução do problema inverso, a solução do problema direto é comparada com a solução de referência, a qual normalmente é constituída por pontos experimentais (ou pseudoexperimentais). Os métodos de otimização são empregados para ajustar os parâmetros ou funções estimadas (ou seja, as variáveis de projeto) de tal forma a minimizar os desvios entre a solução do problema direto e a solução de referência. A FIG 2.2 ilustra as partes integrantes do problema inverso.

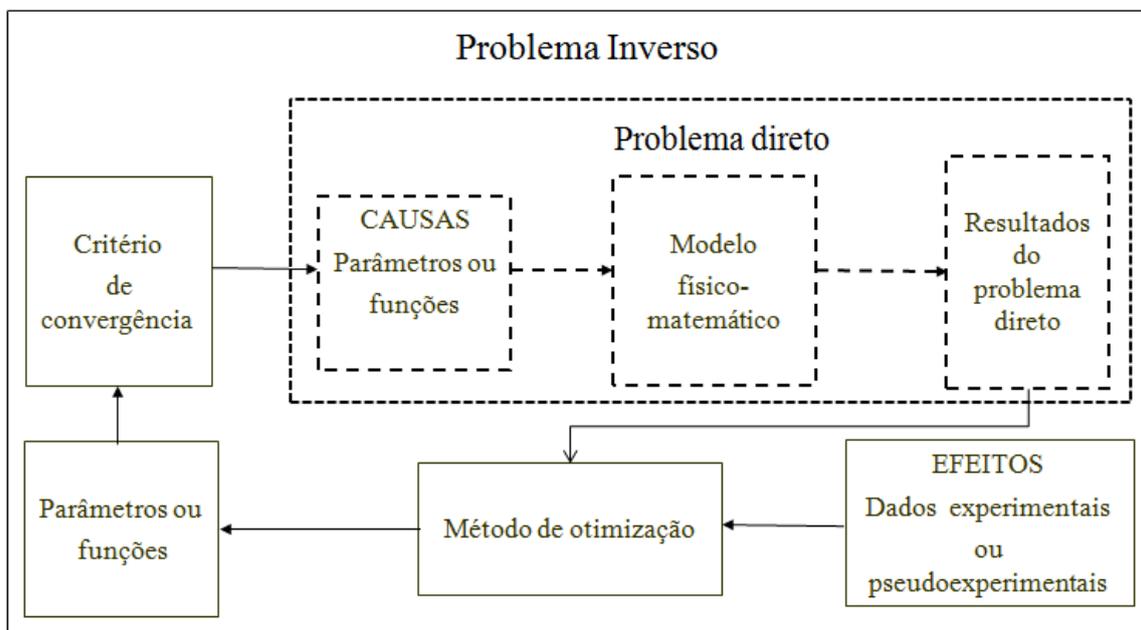


Figura 2.2 – Relação entre o problema direto e inverso

Nota-se que os dados experimentais (ou pseudoexperimentais) possuem o papel de informar o efeito observado. Assim, se houver demasiado erro ao coletá-los (ou ao gerá-los) as causas estimadas podem estar demasiadamente contaminadas com estes erros e não representar as causas que realmente geraram o efeito observado. Além disso, a qualidade da solução encontrada também é diretamente impactada pela quantidade de dados que servem de base de informação (OZISIK & ORLANDE, 2000, VELHO, 2001, CRONEMBERGER, 2012, FERREIRA & VENTURINI, 2009).

A natureza matemática dos problemas inversos o classifica como problema mal-posto, pois, como visto sua solução é impactada pela quantidade e qualidade dos dados experimentais ou pseudoexperimentais (dados de entrada) (OZISIK & ORLANDE, 2000).

Além disso, outro fator acaba por contribuir com a sua classificação. Trata-se da existência e da unicidade da solução do problema (CRONEMBERGER, 2012, OZISIK & ORLANDE, 2000).

A existência da solução do problema inverso só é comprovada devido ao fenômeno físico que pode ser observado, porém a unicidade da solução não é garantida para todos os casos (OZISIK & ORLANDE, 2000).

Assim, o problema inverso não cumpre as três condições que caracterizam um problema como bem posto: a solução deve existir, ela deve ser única e deve ser estável com relação aos dados de entrada (COTTA, 2009, CRONEMBERGER, 2012, OZISIK & ORLANDE, 2000).

Por isso, o problema inverso é reformulado em termos de um problema bem-posto de minimização e assim, sua solução torna-se possível. Essa solução pode ser classificada como estimativa de parâmetros ou de funções (OZISIK & ORLANDE, 2000).

Para a solução de problemas inversos é necessário uma escolha adequada do método de otimização, pois existem características inerentes a cada um deles que podem corresponder ou não as necessidades exigidas para a solução do problema inverso.

A seguir faz-se conhecer duas classificações de métodos de otimização, bem como suas características inerentes, vantagens e desvantagens. Trata-se dos métodos determinísticos e estocásticos.

### 2.1.3 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

"Otimização é o processo de busca da condição de máximo ou mínimo de uma função" (STOECKER, 1971). Assim, diferentes métodos de otimização foram desenvolvidos a fim de minimizar (ou maximizar) uma função objetivo submetida ou não a restrições.

A função objetivo é elaborada de forma a descrever matematicamente uma ou mais características que se deseja otimizar. Dessa forma, a minimização da função objetivo permite a identificação da condição ótima em um modelo matemático.

Durante a busca pela condição ótima, muitas soluções encontradas respeitam as restrições impostas, e por isso são definidas como ótimo local (VENTER, 2010, OZISIK & ORLANDE, 2000).

Os métodos de otimização considerados neste trabalho são de natureza estocástica e por isso, a eles são estendidos maiores detalhes.

#### 2.1.3.1 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICOS

Os métodos determinísticos geralmente são baseados em procedimentos iterativos. Durante todo o processo iterativo, a busca pela solução ótima é direcionada pelo vetor gradiente, obtido na primeira derivada da função objetivo. Cada passo seguinte necessita da informação do passo anterior, e quanto melhor a precisão da estimativa inicial para cada parâmetro, melhor é a solução ótima obtida pelo método (OZISIK & ORLANDE, 2000, VENTER, 2010, COTTA, 2009).

Como vantagem, os métodos determinísticos necessitam de poucos ajustes nos parâmetros de projeto, e avaliam problemas com um grande número de variáveis. Porém, são algoritmos de difícil implementação (COTTA, 2009, VENTER, 2010).

São exemplos de métodos determinísticos: *Levenberg-Marquart* e Gradiente Conjugado.

#### 2.1.3.2 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICOS

Os métodos de otimização evolucionários são métodos estocásticos e tendem a imitar o comportamento da natureza. Um exemplo é o comportamento de um bando de gaivotas em busca de alimento. Nesta população, quando um dos indivíduos localiza o alimento, passa a informação aos demais integrantes do grupo, fazendo com que estes indivíduos mudem seu comportamento e se encaminhem ao alimento. Porém, o movimento de cada indivíduo ainda acontece livremente e se uma melhor fonte de alimento for encontrada, essa nova informação é fornecida ao bando e toda a reorganização se repete. Assim, o grupo permite que melhores soluções, ou seja, melhores fontes de alimento não passem despercebidas (COTTA, 2009, BREVE, 2007, COLAÇO *et al*, 2006, VENTER, 2010, SANTOS *et al*, 2012).

A FIG. 2.3 exibe uma representação esquemática do comportamento evolucionário a procura de melhores alimentos.

O melhor alimento localiza-se no centro do diagrama. Na busca por esse alimento as populações evoluem nas fases  $k=0,1,2,3$  e 4. Na primeira fase ( $k=0$ ) a população encontra o alimento (A) que julga ser o melhor. Entretanto, um dos seus indivíduos encontra um novo alimento, o alimento (B) e avisa ao restante do grupo. Assim, a nova geração ( $k=1$ ) é criada

em torno do alimento B. Novamente, um dos indivíduos localiza um alimento mais interessante, o alimento C e avisa a todo o grupo. Por isso, em  $k=2$  a nova geração é criada em torno do mais novo alimento, o alimento (C). Esse comportamento se repete, até que, finalmente, um de seus indivíduos localiza o alimento tão desejado localizado no centro do diagrama. Ele avisa a todo o bando e a nova geração ( $k=4$ ), é criada em torno do melhor alimento que pode ser fornecida ao bando.

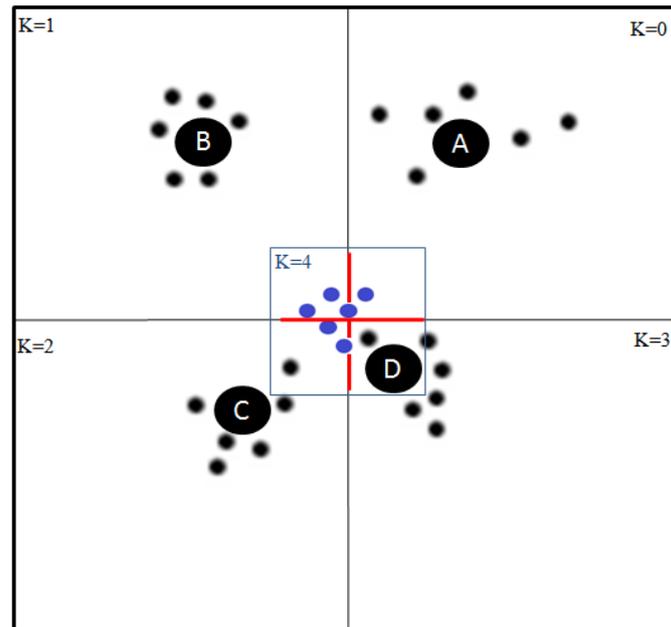


Figura 2.3 – Representação esquemática do comportamento evolutional a procura de melhores alimentos

Esse comportamento é imitado pelos métodos de otimização evolucionários, sendo desnecessária a orientação de um vetor gradiente na busca pela solução ótima, bem como, a utilização das derivadas para chegar a ela (COTTA, 2009, BREVE, 2007, COLAÇO *et al*, 2006, VENTER, 2010).

Os métodos estocásticos são adequados para lidar com funções objetivo fortemente não-lineares e com problemas onde não estão disponíveis boas estimativas iniciais para os parâmetros. Além disso, também são de fácil implementação. Porém, apresentam como desvantagens: alto custo computacional e ajustes empíricos dos parâmetros do método (COTTA, 2009, SANTOS *et al*, 2012, VENTER, 2010, VALLE *et al*, 2008).

A construção dos algoritmos evolucionários de otimização se baseia na geração estocástica de uma população constituída por possíveis soluções para o problema de

otimização. Cada indivíduo da população evolui ao buscar a minimização da função objetivo. Portanto, os indivíduos com os menores valores para a função objetivo são os mais relevantes na evolução da população. Desta forma, as sucessivas evoluções da população conduzem a um mínimo para a função objetivo (COTTA, 2009, VENTER, 2010, COLAÇO *et al*, 2006, MEDEIROS, 2005, MORAES & NAGANO, 2012).

O sucesso na obtenção da solução nos problemas de otimização dependem da escolha adequada do método. Assim, em muitos casos, são necessários ajustes empíricos para obter a melhor solução em cada método, e até mesmo para haver convergência dos resultados.

Neste trabalho empregam-se os métodos estocásticos "*Random Restricted Window*" - R2W e "*Particle Swarm Optimization*" – PSO.

### 2.1.3.3 RANDOM RESTRICTED WINDOW – R2W

A tradução do nome do método R2W sintetiza a explicação dos fundamentos deste método. Ou seja, o método se baseia na busca por soluções em uma região restrita do domínio denominada janela.

Neste método, uma população é gerada estocasticamente dentro da janela e a cada geração uma nova população é criada em torno do indivíduo associado ao menor valor da função objetivo ( $\zeta_i^*$ ).

A EQ. 2.1 representa o procedimento para a criação de cada parâmetro para cada indivíduo da população (BIHAIN *et al*, 2012).

$$\zeta_i = \zeta_{iL} + R(\zeta_{iH} - \zeta_{iL}) \quad (2.1)$$

onde  $\zeta_{iL}$  e  $\zeta_{iH}$  são, respectivamente, o menor e o maior valor do parâmetro. Esses valores definem os limites da janela, e R é um número randômico com distribuição uniforme, entre zero e um.

Ao longo do procedimento de otimização, exibido na FIG. 2.4, caso a convergência não seja atingida na primeira população, os limites da janela são redefinidos segundo as EQ. 2.2 e EQ. 2.3. Nessas equações é introduzido o fator de restrição  $\delta$ , que define o tamanho da janela.

$$\zeta_{iL} = \zeta_i^* - \delta(\zeta_i^*) \quad (2.2)$$

$$\zeta_{iH} = \zeta_i^* + \delta(\zeta_i^*) \quad (2.3)$$

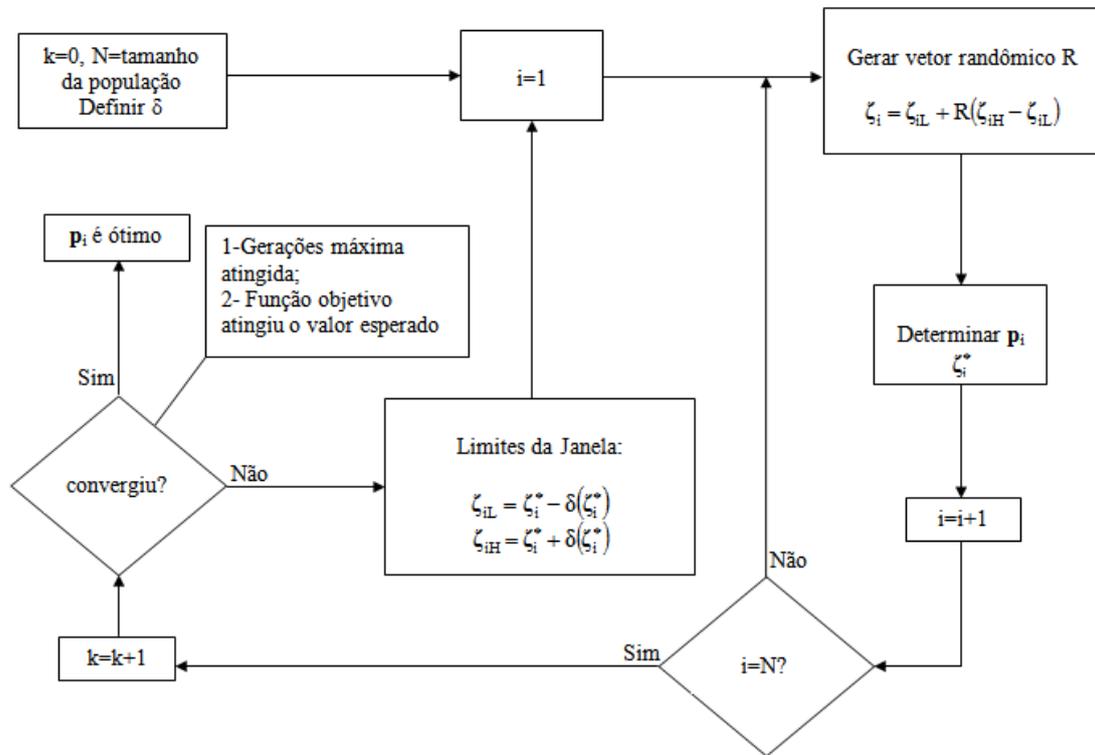


Figura 2.4 –Diagrama esquemático do R2W

Uma representação esquemática do método de otimização R2W é apresentado por meio da FIG. 2.5.

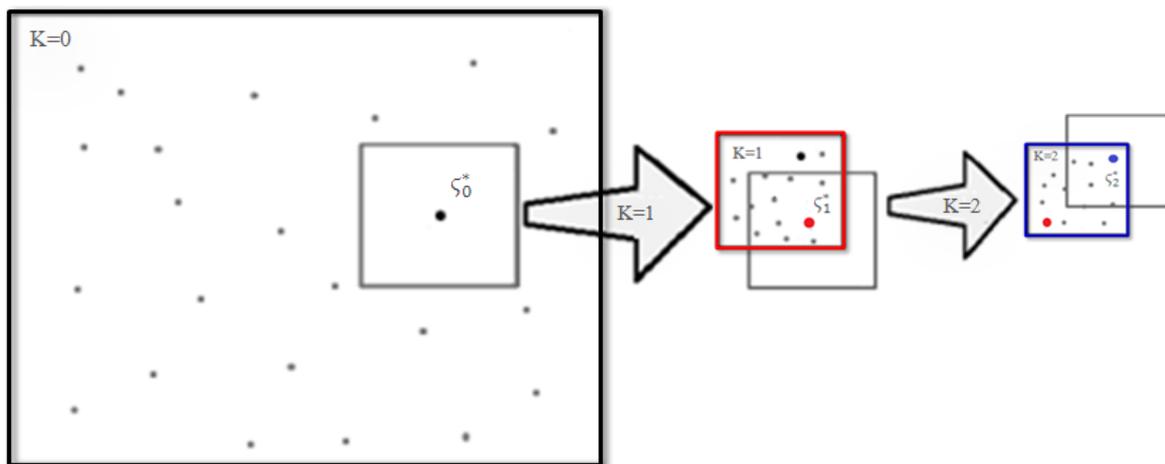


Figura 2.5 – Representação esquemática do R2W (Fonte: Adaptado de BIHAIN *et al*, 2012)

É possível observar como a evolução populacional, em cada nova fase, acontece em torno do indivíduo com o menor valor para a função objetivo.

O método converge quando o valor da função objetivo associado a um dos indivíduos dessa população satisfaz o critério de convergência adotado (BIHAIN *et al*, 2012).

Entretanto, há casos em que os indivíduos da população não conseguem evoluir de forma a atender o critério de convergência adotado. A estratégia para esses casos é estabelecer um número máximo de gerações como segundo critério de parada (BIHAIN *et al*, 2012, CANEDO, 2005, COLAÇO *et al*, 2006, HELWIG, 2010).

#### 2.1.3.4 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION – PSO

O método de otimização evolucionário PSO descreve o movimento de um enxame de partículas em busca de um mínimo da função objetivo. Neste método, procura-se ponderar o conhecimento individual e o conhecimento da população, considerando a melhor experiência individual e a melhor experiência coletiva. Cada partícula está associada a uma posição e uma velocidade. Além disso, cada parâmetro da partícula deve pertencer a um intervalo determinado pelo valor inferior e superior do parâmetro (DREHMER, 2012, MEDEIROS, 2005, COLAÇO *et al*, 2006, HELWIG, 2010).

A cada nova iteração a posição de cada partícula é atualizada, considerando a velocidade e a posição da partícula na iteração anterior. No procedimento evolutivo,  $\alpha$  é o parâmetro inercial e  $\beta$  é o parâmetro de aprendizagem, enquanto  $r_1$  e  $r_2$  são números randômicos com distribuição uniforme, entre 0 e 1. O parâmetro  $\gamma_i^k$  é a melhor posição de todas as partículas em cada iteração e o parâmetro  $\gamma_g$  é a melhor posição de todas as partículas durante todas as iterações (CANEDO, 2005, COLAÇO *et al*, 2006, HELWIG, 2010).

A velocidade de cada partícula é avaliada conforme a EQ. 2.4. Seu primeiro termo representa a inércia da partícula, o segundo o conhecimento individual, enquanto o terceiro o conhecimento coletivo ou social (CANEDO, 2005, COLAÇO *et al*, 2006, HELWIG, 2010).

$$V_i^{k+1} = \alpha V_i^k + \beta r_1 (\gamma_i^k - x_i^k) + \beta r_2 (\gamma_g - x_i^k) \quad (2.4)$$

O termo inércia da partícula, em geral, decresce no decorrer do processo iterativo e tem seu peso determinado por  $\alpha$ . Trata-se de um indicador e revela o quanto da velocidade atual impactará na velocidade da partícula na próxima iteração (COLAÇO *et al*, 2006, ESPOSITO, 2012).

A cada nova iteração deve ser atualizada a nova posição da partícula. Ela é calculada a partir da EQ. 2.5 e recebe a influência da velocidade atualizada (CANEDO, 2005, COLAÇO *et al*, 2006, HELWIG, 2010).

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^{k+1} \quad (2.5)$$

A FIG. 2.6 exibe uma representação vetorial do cálculo da nova posição e da nova velocidade de cada partícula.

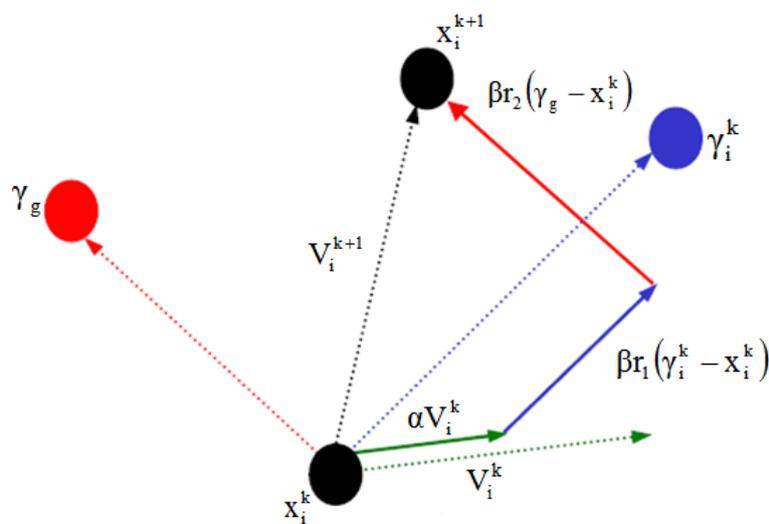


Figura 2.6 – Representação vetorial do cálculo da nova posição e velocidade de cada partícula (Fonte: Adaptado de HASSAN *et al*, 2004)

O processo iterativo da evolução da população permanece até que o critério de convergência seja satisfeito ou o número máximo de gerações seja atingido (CANEDO, 2005, COLAÇO *et al*, 2006, HELWIG, 2010).

Estabelecer um número máximo de gerações como segundo critério de parada é necessário, pois há casos em que os indivíduos da população não conseguem evoluir de forma a atender ao primeiro critério de convergência adotado (BIHAIN *et al*, 2012, CANEDO, 2005, COLAÇO *et al*, 2006, HELWIG, 2010).

Um diagrama esquemático do método PSO é apresentado na FIG. 2.7.

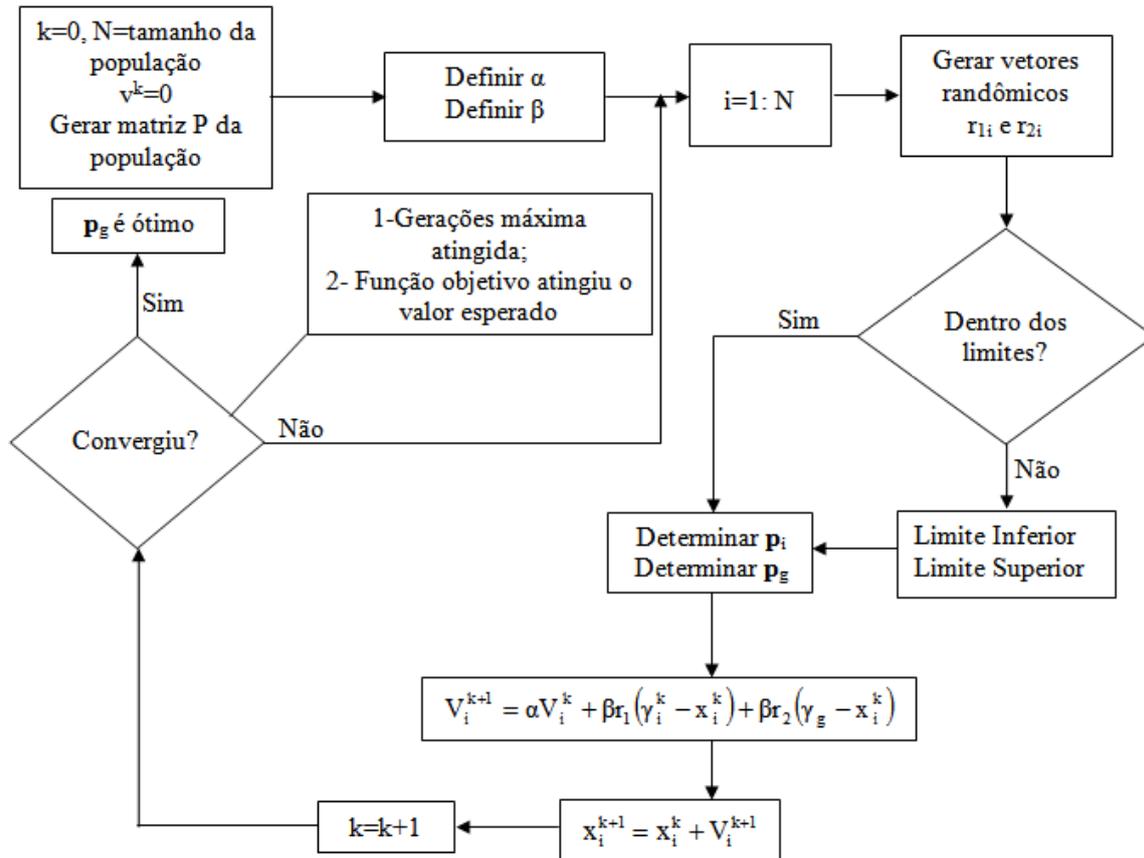


Figura 2.7 – Diagrama esquemático do método de otimização PSO (Fonte: COLAÇO *et al*, 2006)

## 2.2 MODELAGEM, OTIMIZAÇÃO E ESTIMATIVA DE PARÂMETROS APLICADOS À SISTEMAS DE SUSPENSÕES VEICULARES

Esta seção destina-se a apresentação das principais referências utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, estando a mesma subdividida em três partes. A primeira é voltada para a modelagem da dinâmica veicular, a segunda é relativa à otimização de sistemas de suspensão, e a terceira é dedicada à estimativa de parâmetros de sistemas de suspensão.

### 2.2.1 MODELAGEM DA DINÂMICA VEICULAR

RAVISHANKAR & SUJATHA (2007) estudaram um veículo militar sobre lagartas com 7 eixos e com suspensões passivas e independentes. Avaliou-se a aceleração vertical do CG e a aceleração angular do chassi para diferentes valores de rigidez da suspensão e diferentes

perfis de terreno. Os terrenos foram descritos por funções de densidade de potência espectral com ruído branco e diferiam apenas no valor da variância da irregularidade. O estudo ainda considerou a velocidade do veículo ( $v$ ),  $1\text{m/s} \leq v \leq 18\text{m/s}$ , e um modelo de  $\frac{1}{2}$  carro. Os resultados demonstraram que somente para  $2\text{m/s} \leq v \leq 14\text{m/s}$ , houve um aumento significativo para a aceleração vertical do CG e angular do chassi. Observou-se que quanto maior o valor da rigidez da suspensão maior é o valor das acelerações medidas. Resultado equivalente foi observado para os diferentes valores de variância, ou seja, quanto maior o valor da irregularidade da pista, maior é a aceleração vertical do CG e angular do chassi.

CAVALHEIRO & AVILA (2010) analisaram a influência dos parâmetros de rigidez e amortecimento da suspensão passiva no desempenho dos modelos de  $\frac{1}{4}$  e de  $\frac{1}{2}$  carro, considerando diferentes fontes de excitação de base. Este trabalho foi realizado no *Simulink*<sup>®</sup> do *MatLab*<sup>®</sup>. Os efeitos sobre a massa suspensa após variações nos coeficientes de amortecimento e rigidez da suspensão foram avaliados, considerando terrenos senoidais e randômicos. Os resultados demonstraram que a suspensão passiva é muito sensível a alteração dos seus parâmetros e possui desempenho diverso para cada terreno. Ou seja, para os mesmos parâmetros do sistema, o desempenho da suspensão passiva difere para cada terreno.

KADIR *et al* (2012) estudaram um veículo sobre lagartas a partir de um modelo de  $\frac{1}{4}$  de carro, empregando o *Simulink*<sup>®</sup> do *Matlab*<sup>®</sup>. O terreno foi representado por uma função periódica cuja amplitude máxima é igual a 0,06m e frequência de 14,3Hz. Os resultados obtidos a partir da simulação foram comparados aos obtidos a partir do experimento em laboratório, e assim, o modelo computacional desenvolvido pôde ser validado. Para validação do modelo analisou-se o deslocamento da suspensão. Os resultados simulados frente aos experimentais foram satisfatórios.

AGHARKAKLI *et al* (2012) empregaram o modelo de  $\frac{1}{4}$  de carro no *Simulink*<sup>®</sup> do *Matlab*<sup>®</sup> para estudar o desempenho de suspensões passivas e ativas. O terreno foi representado por uma função senoidal com frequências iguais a 4Hz e a 8Hz. Analisou-se o deslocamento, a aceleração vertical do CG do chassi, a deflexão dos pneus e a deflexão da suspensão. Os resultados mostraram que a suspensão ativa é melhor para o conforto dos passageiros e para a segurança do veículo.

KABBANI & SERRANO (2013) estudaram o efeito do número de eixos sobre a velocidade máxima de um veículo não tripulado (UGV), a partir de um modelo de  $\frac{1}{2}$  carro e que trafega em terrenos com rugosidades diversas, cuja classificação é definida entre 0 (alta rugosidade) e 1 (perfeitamente liso). O modelo é constituído por suspensões passivas e independentes. A velocidade máxima ajusta-se automaticamente a partir das informações

recebidas a respeito do tipo de terreno e as características do veículo, sem que exceda os valores máximos permitidos para a força e o momento transmitidos ao chassi. Ou seja, o veículo transita com segurança em terrenos com diferentes características de rugosidade. Para seu estudo considerou-se um veículo leve (modelo experimental de laboratório com 2 eixos) e um veículo pesado (veículo militar sobre lagarta, Leopard1, com 3, 4, 5, 6 e 7 eixos), para o qual desconsiderou-se o efeito das lagartas sobre a dinâmica da suspensão. Os resultados mostraram que para o mesmo veículo, a velocidade máxima aumenta com a diminuição da rugosidade. E para uma mesma rugosidade do terreno, quanto maior o número de eixos, maior é a velocidade do veículo.

ATA & OYADIJI (2014) realizaram um estudo teórico sobre o efeito da configuração de da suspensão de um veículo militar sobre lagartas (M113-A3) ao trafegar sobre um terreno com uma lombada. O veículo avaliado possuía 5 eixos e suspensões passivas e independentes em todas as rodas. Três tipos diferentes de terreno foram avaliados, os quais diferiam somente quanto a largura da lombada. As análises foram feitas para o veículo se deslocando a 10km/h, 40 km/h e a 60 km/h. Buscou-se encontrar a melhor localização e o número de amortecedores a fim de melhorar o conforto da tripulação. Os resultados indicaram que a melhor configuração correspondeu aos amortecedores posicionados na primeira, segunda e quinta roda.

ATA (2014) complementou o estudo realizado por ATA & OYADIJI (2014) ao propor um sistema de suspensão semi-ativa visando melhorar o conforto da tripulação e a manobrabilidade do veículo. O sistema inteligente empregava um amortecedor com um fluido magnetoreológico que alterava suas características de amortecimento de acordo com as condições do terreno. O trabalho levou em conta terrenos com lombada, senoidais e randômicos. O trabalho combinou análises teóricas fundamentadas em modelos matemáticos e simulações computacionais com experimentos de modelos em escala reduzida em laboratório. Três estratégias de controle foram estudadas. Os resultados indicaram que utilização do sistema de controle inteligente híbrido com lógica nebulosa (*fuzzy logic*) apresentou melhor desempenho, sendo indicado para o sistema de suspensão semi-ativa proposto.

## 2.2.2 OTIMIZAÇÃO DA SUSPENSÃO VEICULAR

SHIRAHATT *et al* (2008) otimizaram, por meio do Algoritmo Genético, os elementos da suspensão passiva e ativa de um veículo de passeio, segundo a norma ISO 2631. Considerou-se o modelo do carro completo, incluindo um dos bancos de passageiros nas equações que governam os movimentos do veículo. Os resultados para o deslocamento e aceleração do banco do passageiro e para a deflexão dos pneus mostraram que a suspensão ativa proporciona melhor conforto para o passageiro e segurança para o veículo.

TUNG *et al* (2011) otimizaram, conforme ISO 2631 e por meio do método “*Particle Swarm Optimization*” – PSO, os parâmetros de um novo controlador para a suspensão ativa de um modelo de ½ carro. Seu desempenho foi comparado a de outro controlador baseado na teoria de controle linear quadrático ótimo, e ao desempenho da suspensão passiva. Foram analisados os resultados para a aceleração vertical do CG e angular do chassi e para os deslocamentos das rodas. O estudo mostrou que o desempenho do controlador otimizado por meio do PSO permitiu melhora significativa nas acelerações e deslocamentos do chassi e das rodas.

GOGA & KLUCIK (2012) otimizaram a suspensão passiva de um veículo com 2 eixos, atendendo simultaneamente ao conforto e à dirigibilidade de forma a atenuar o conflito existente entre ambos. Os parâmetros da suspensão passiva (rigidez da suspensão e coeficiente de amortecimento) empregando um modelo de ½ carro foram otimizados pelo método do Algoritmo Genético. A função objetivo foi construída a partir de quatro critérios com mesmo peso: a aceleração vertical do CG do chassi, a aceleração angular do chassi, o deslocamento do primeiro eixo e o deslocamento do segundo eixo. O Algoritmo Genético se baseia no mecanismo evolutivo da seleção natural e nos princípios da genética, por isso pertencem à classe da computação evolutiva, cuja inspiração é a teoria de Darwin sobre a evolução - a sobrevivência do mais forte. Os parâmetros otimizados da suspensão, rigidez e coeficiente de amortecimento, dianteiros e traseiros, reduziram significativamente as amplitudes das grandezas presentes na função objetivo: a aceleração vertical do CG, a aceleração angular do chassi, o deslocamento do primeiro eixo e o deslocamento do segundo eixo, resultando em menor tempo para restauração do equilíbrio mecânico dinâmico do veículo.

JABEEN (2013) otimizou os parâmetros da suspensão (molas e amortecedores não-lineares, a partir de um modelo de ½ carro e assim como GOGA & KLUCIK (2012) também

utilizou o método do Algoritmo Genético. O modelo estudado incluía dois bancos com suspensão para os passageiros, um na posição frontal e outro na parte traseira do veículo. A função objetivo estava sujeita a restrições para manter o conforto dos passageiros (conforme ISO 2631:1997), para assegurar a integridade da estrutura do chassi, para manter o contato entre o pneu e o terreno e para manter a frequência natural da massa suspensa abaixo da frequência de excitação. O veículo trafegava por dois tipos de terreno, representados por funções periódicas triangular e trapezoidal. Os parâmetros otimizados permitiram melhora significativa no conforto dos passageiros quando comparado aos valores originais de projeto.

ABBAS *et al* (2013) também utilizaram o Algoritmo Genético para otimizar os parâmetros da suspensão das rodas e do banco do motorista, a partir do modelo de  $\frac{1}{2}$  carro com terreno senoidal. A função objetivo considerava a deflexão da suspensão do banco do motorista, a aceleração do banco e da cabeça do motorista. Desta forma, a otimização visava melhorar o conforto do motorista. Os parâmetros otimizados permitiram minimizar significativamente as acelerações e os deslocamentos das partes analisadas do corpo do motorista. Além disso, a melhora também ocorreu em relação às acelerações do chassi do veículo e ao deslocamento do banco do motorista.

### 2.2.3 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DA SUSPENSÃO VEICULAR

FISCHER & ISERMANN (2004) propuseram a identificação, controle e o diagnóstico de falhas no sistema de suspensão ativo e semiativo de um veículo, por meio de um modelo de  $\frac{1}{4}$  de carro. As medidas experimentais da aceleração vertical chassi e dos pneus, bem como a deflexão da suspensão foram coletadas por meio de sensores acoplados ao veículo. Utilizaram o algoritmo “*Recursive Least Square*” – RLS , que se mostrou eficaz para o propósito apresentado para estudo.

LI *et al* (2007) estudaram o veículo “*Coradia Class 175*”, trem fabricado pela empresa francesa “*Alstom Transport*”. Um modelo de multicorpos constituído por corpos rígidos foi implementado no software *Vampire*<sup>®</sup>. Foram estimados os coeficientes de amortecimento do sistema de suspensão passivo relativo aos movimentos angulares “*roll*” e “*yaw*”, por meio do método de otimização evolucionário “*Rao-Blackwellized Particle Filter*” – RBPF. O estudo é motivado para se tomar conhecimento de possíveis falhas no sistema de suspensão e assim, possibilitar a manutenção preventiva. Os resultados do estudo mostraram que a metodologia proposta era relevante para a manutenção do sistema veicular.

BRUYNE *et al* (2011) propuseram um novo algoritmo para a estimativa dos parâmetros inerciais de um veículo de passeio. O estudo foi motivado devido a alterações que ocorrem na massa do veículo, no seu momento de inércia e da posição do centro de gravidade do veículo, quando este se encontra em operação. O novo algoritmo combinava a rigidez da suspensão, bem como o deslocamento da mesma a fim de estimar a massa do veículo e o seu centro de massa. O Método de Monte Carlo determinava a mais provável distribuição de massa do sistema, considerando dados antropométricos para calcular as propriedades de inércia de cada passageiro. O método de Monte Carlo gerou amostras aleatórias da carga útil a partir da função de densidade de distribuição de probabilidades que representa o fenômeno físico. Ao comparar a massa e a posição de centro de gravidade do veículo carregado e os dados de medição para o veículo vazio, foi calculada a posição do centro de gravidade do veículo e a sua carga total.

KRAFT *et al* (2013) estimaram os parâmetros da suspensão de um trem de alta velocidade (TGV). Estes parâmetros são relevantes na homologação e no monitoramento das condições de operação do TGV. Um modelo de multicorpos constituído por corpos rígidos e desenvolvido no software *Vampire*<sup>®</sup> foi utilizado. A estimativa de parâmetros foi realizada minimizando a diferença entre as medidas experimentais e as simuladas por meio de três métodos de otimização, o Algoritmo Genético, “*Pattern Search*” e “*Simulated Annealing*”, utilizados na rotina de problema inverso. O desempenho do Algoritmo Genético se mostrou superior aos demais.

IWANIEC (2013) propôs a estimativa da rigidez da suspensão e da massa suspensa de um veículo por meio do modelo de ¼ de carro, com função para a excitação de base representada pela função degrau. As medidas experimentais da aceleração vertical foram coletadas a partir de dois sensores piezoelétricos, um localizado na massa suspensa e outro na não suspensa. Foi utilizado o método “*Exploitational nonlinear system identification*” e os parâmetros foram estimados com erro menor que 2%.

IMINE & MADANI (2014) estimaram a rigidez da suspensão, a massa não suspensa de um veículo e a força vertical proveniente da ação da excitação de base sobre os pneus, por meio o método numérico “*High-Order Sliding-Mode*” – HOSMO. Utilizaram um modelo de ½ carro desenvolvido no *Simulink*<sup>®</sup> do *Matlab*<sup>®</sup>, com dois eixos, suspensões passivas e independentes. Foram utilizados onze sensores para a coleta das medidas experimentais. Quatro sensores coletavam a aceleração vertical dos pneus, três sensores coletavam os deslocamentos angulares “*roll*”, “*pitch*” e “*yaw*” e quatro sensores coletavam as medidas da

deflexão da suspensão. O erro presente nas estimativas dos parâmetros são aproximadamente nulos.

IMINE *et al* (2014) empregaram um modelo de  $\frac{1}{2}$  carro com dois eixos, suspensão passiva e independente, desenvolvido no *Simulink*<sup>®</sup> do *Matlab*<sup>®</sup> para estimar a força vertical proveniente da ação de excitação de base sobre os pneus. Também buscavam identificar propriedades do veículo como a massa não suspensa e os parâmetros da suspensão (rigidez da suspensão e coeficiente de amortecimento). Para tal otimização utilizaram o método “*Least Square Method*” e o erro presente nas estimativas dos parâmetros são menores que 2%. As medidas experimentais foram obtidas por sensores que coletavam o deslocamento angular “*roll*”, a deflexão da suspensão e a aceleração vertical dos pneus.

XUE *et al* (2015) propuseram o diagnóstico de possíveis falhas na suspensão de um veículo por meio do “*Fast Wavelet Transform Algorithm*” - (FWT) do “*Matlab*<sup>®</sup>”. Foram estimados os parâmetros da suspensão passiva do veículo, por meio de um modelo de  $\frac{1}{2}$  carro. Os resultados mostraram que o método aplicado foi eficaz na identificação de falhas e monitoramento do sistema de suspensão.

## 2.3 CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica realizada indicou referências relevantes para o entendimento dos fundamentos de dinâmica veicular, dos métodos de otimização e das técnicas de problema inverso necessários para o desenvolvimento desta dissertação. Ademais, a revisão bibliográfica constatou que a utilização da abordagem de problema inverso vem sendo estudada para monitorar parâmetros da suspensão de veículos, em especial trens.

A revisão bibliográfica também aponta para a possibilidade de empregar o R2W e o PSO na solução de problemas inversos e de otimização aplicados a suspensões veiculares. Não tendo sido reportadas referências nesta área, sendo, portanto uma lacuna a ser preenchida.

Desta forma, a proposta da presente dissertação que visa estimar parâmetros da suspensão de veículos militares encontra sustentação teórica.

### 3 O PROBLEMA DIRETO

O presente capítulo apresenta o modelo físico-matemático e as restrições às quais está submetido. Também são conhecidos os parâmetros que regem o modelo, bem como o modelo do terreno sobre o qual o veículo trafega.

#### 3.1 O MODELO FÍSICO

O modelo proposto é baseado no veículo militar M113 com 5 eixos e suspensões passivas (ATA, 2014), o qual tem seu modelo físico ilustrado pela FIG.3.1.

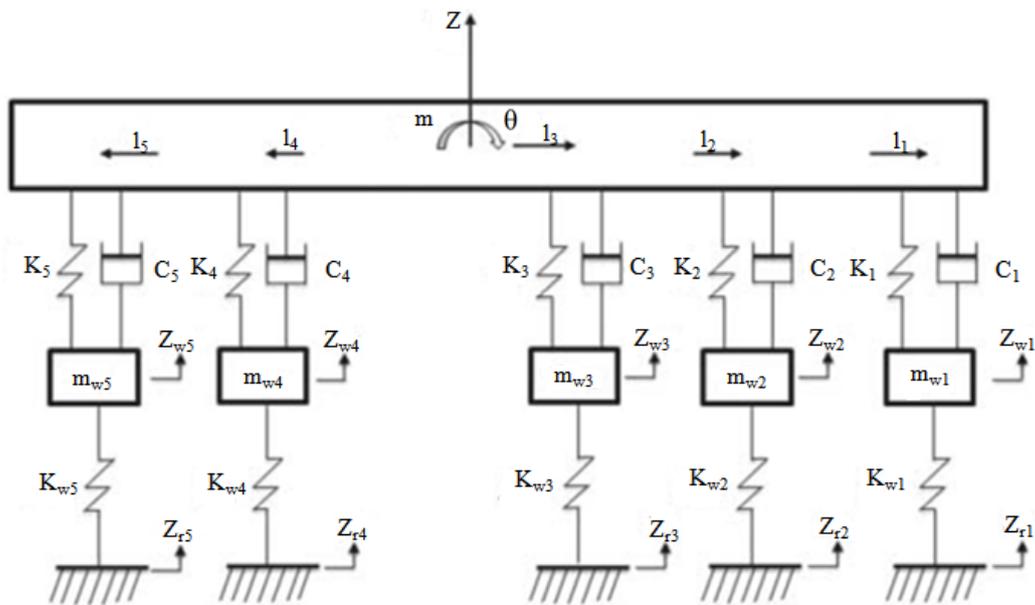


Figura 3.1 – Modelo de 1/2 carro com 5 eixos (Fonte: Adaptado de ATA, 2014)

Neste modelo são adotadas as seguintes considerações:

- o terreno não se deforma;
- não são analisados os movimentos angulares “roll” e “yaw” do chassi;
- todas as análises são feitas no referencial inercial;
- o chassi é assumido como corpo rígido;
- não é considerado o efeito da lagarta na dinâmica da suspensão;

- as barras de torção são representadas por molas cujo comportamento é linear;
- não é considerado o fator de amortecimento para os pneus;
- os amortecedores da suspensão possuem o coeficiente de amortecimento constante;
- suspensão passiva em todas as rodas;e
- duas rodas por eixo.

Entretanto, de forma a permitir sua aplicação em outros casos de estudo são realizadas algumas adaptações. Elas têm por objetivo permitir:

- estudar o comportamento de um modelo de ½ carro considerando diferentes números de eixos;
- modificar a posição de fixação da suspensão no chassi;
- considerar suspensões somente com mola ou com mola e amortecedor;
- considerar diferentes valores de rigidez das suspensões e de coeficientes de amortecimento; e
- considerar diferentes valores para a rigidez dos pneus.

Assim, o modelo de ½ carro pode ser aplicado a diferentes configurações de veículos.

Na TAB. 3.1 estão disponíveis os parâmetros utilizados no modelo de ½ carro e suas respectivas unidades.

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados no modelo de ½ carro

		Parâmetro	Símbolo	Unidade
Chassi		Massa	m	kg
		Momento de Inércia em relação ao CG	$I_y$	kg.m <sup>2</sup>
		<i>Pitch</i>	$\theta$	rad
		<i>Bounce</i>	Z	m
Eixo (i)	Suspensão	Rigidez da suspensão	$K_i$	N/m
		Coeficiente de Amortecimento	$C_i$	Ns/m
	Pneu	Deslocamento	$Z_{wi}$	m
		Rigidez	$K_{wi}$	N/m
	Posição	Posição em relação ao CG	$l_i$	m

Continuação da TAB.3.1

	Parâmetro	Símbolo	Unidade
Velocidade do veículo	Velocidade	$v^a$	km/h
Terreno	Excitação de Base	$Z_{ri}$	m
	Largura do Obstáculo	$w$	m
	Altura do Obstáculo	$h$	m
Pneu-solo	Força de contato pneu-solo	$F_i$	N

### 3.2 O MODELO DE 1/2 CARRO

A dinâmica do modelo de 1/2 carro é regida pelas EQ. 3.1 a 3.3 (ATA, 2014). Estas equações formam um sistema de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem, cujas condições iniciais correspondem a condição de equilíbrio mecânico dinâmico do veículo, ou seja, com velocidade veicular não nula, porém com força e momento resultantes nulos.

$$m \ddot{Z} + \sum_{i=1}^N C_i (\dot{Z} + l_i \dot{\theta} - \dot{Z}_{wi}) + \sum_{i=1}^N K_i (Z + l_i \theta - Z_{wi}) = 0 \quad (3.1)$$

$$I_y \ddot{\theta} + \sum_{i=1}^N C_i (\dot{Z} + l_i \dot{\theta} - \dot{Z}_{wi}) l_i + \sum_{i=1}^N K_i (Z + l_i \theta - Z_{wi}) l_i = 0 \quad (3.2)$$

$$m_{wi} \ddot{Z}_{wi} - C_i (\dot{Z} + l_i \dot{\theta} - \dot{Z}_{wi}) - K_i (Z + l_i \theta - Z_{wi}) + K_{wi} (Z_{wi} - Z_{ri}) = 0 \quad (3.3)$$

As EQ. 3.1 a 3.3 descrevem, respectivamente, o movimento vertical do centro de gravidade (CG) do chassi (“*bounce*”), o movimento angular de arfagem do chassi (“*pitch*”) e o movimento vertical de cada roda. É importante ressaltar que estas equações podem ser aplicadas a veículos com diversas configurações, diferentes números de eixos e que trafeguem por diferentes tipos de terreno.

As EQ. 3.1 a 3.3 podem ser escritas na forma matricial, conforme EQ. 3.4.

$$[M]\ddot{z} + [C]\dot{z} + [K]z = 0 \quad (3.4)$$

<sup>a</sup> A conversão para [m/s] é realizada pelo código computacional.

Desta forma, particularizando para um modelo de 1/2 carro com 5 eixos (ATA, 2014) tem-se:

$$M = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{w1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{w2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{w3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{w4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{w5} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$K = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^5 K_i & \sum_{i=1}^5 l_i K_i & -K_1 & -K_2 & -K_3 & -K_4 & -K_5 \\ \sum_{i=1}^5 l_i K_i & \sum_{i=1}^5 l_i^2 K_i & -l_1 K_1 & -l_2 K_2 & -l_3 K_3 & -l_4 K_4 & -l_5 K_5 \\ -K_1 & -l_1 K_1 & K_1 + K_{w1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_2 & -l_2 K_2 & 0 & K_2 + K_{w2} & 0 & 0 & 0 \\ -K_3 & -l_3 K_3 & 0 & 0 & K_3 + K_{w3} & 0 & 0 \\ -K_4 & -l_4 K_4 & 0 & 0 & 0 & K_4 + K_{w4} & 0 \\ -K_5 & -l_5 K_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_5 + K_{w5} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$C = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^5 C_i & \sum_{i=1}^5 l_i C_i & -C_1 & -C_2 & -C_3 & -C_4 & -C_5 \\ \sum_{i=1}^5 l_i C_i & \sum_{i=1}^5 l_i^2 C_i & -l_1 C_1 & -l_2 C_2 & -l_3 C_3 & -l_4 C_4 & -l_5 C_5 \\ -C_1 & -l_1 C_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_2 & -l_2 C_2 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ -C_3 & -l_3 C_3 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ -C_4 & -l_4 C_4 & 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 \\ -C_5 & -l_5 C_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$z = [Z \ \theta \ Z_{w1} \ Z_{w2} \ Z_{w3} \ Z_{w4} \ Z_{w5}]^T \quad (3.8)$$

No modelo proposto, o terreno exerce uma excitação de base sobre as rodas do veículo. Assim, a excitação de base produzida por uma lombada no terreno, aplicada na roda dianteira do modelo de 1/2 carro é matematicamente representada por

$$Z_{r1}(t) = \begin{cases} h \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \left( \frac{v}{w} \right) (t - 0.5) \right) \right], & 0.5 \leq t \leq 0.5 + \left( \frac{w}{v} \right) \\ 0, & \text{outros casos} \end{cases} \quad (3.9)$$

onde  $w$  é a largura da lombada e  $v$  é a velocidade do veículo (ATA, 2014). Além disso, cada roda  $i$  subsequente, recebe a excitação de base ( $Z_{ri}$ ), EQ. 3.10, com um atraso ( $\tau_i$ ) em relação a roda dianteira, EQ. 3.11.

$$Z_{ri}(t) = Z_{r1}(t + \tau_i) \quad (3.10)$$

$$\tau_i = \frac{(l_1 - l_i)}{v} \quad (3.11)$$

A ação da excitação de base sobre cada pneu dá origem a força de contato pneu-solo ( $F_w$ ), descrita na forma matricial, segundo a EQ. 3.12. E a EQ. 3.4 é reescrita segundo a EQ. 3.13.

$$F_w = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Z_{r1} K_{w1} \\ Z_{r2} K_{w2} \\ Z_{r3} K_{w3} \\ Z_{r4} K_{w4} \\ Z_{r5} K_{w5} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$[M]\ddot{z} + [C]\dot{z} + [K]z = F_w \quad (3.13)$$

### 3.3 CONCLUSÃO

O modelo de 1/2 carro ora apresentado é um problema de valor inicial, adequado para avaliar a dinâmica de um veículo quanto aos movimentos de *bounce* e *pitch* do chassi e ao movimento vertical de cada roda. Porém, com este modelo não é possível avaliar os movimento de rolagem (*roll*) e deriva (*yaw*) do chassi.

A despeito de sua simplicidade, o modelo proposto é facilmente adaptado a diversas configurações de veículos, com diferentes números de eixos, sendo também possível avaliar o efeito de diferentes tipos de terreno sobre o veículo.

## 4 VERIFICAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL

O objetivo deste capítulo é verificar se o modelo de 1/2 carro, apresentado no CAPÍTULO 3, assim como sua solução numérica estão corretamente implementados computacionalmente, permitindo assim sua utilização como problema direto nesta dissertação.

A verificação em tela é executada confrontando os resultados obtidos pelo modelo proposto com os resultados de referências (GOGA & KLUCIK, 2012, ATA, 2014). Desta forma, o modelo de 1/2 carro é, inicialmente, empregado na simulação de um veículo sobre rodas com 2 eixos, trafegando sobre um terreno com um degrau (GOGA & KLUCIK, 2012). E em seguida, na simulação de um veículo sobre lagartas com 5 eixos, trafegando sobre um terreno com uma lombada (ATA, 2014).

A solução numérica do sistema de equações diferenciais ordinárias de 2ª ordem constituintes do modelo de 1/2 carro é efetuada pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem, com passo de integração igual a 0,001s. Ademais, o computador utilizado possui a seguinte configuração: Intel® Dual Core 1,87 GHz, 4GB de memória RAM e sistema operacional de 32 Bits.

### 4.1 VERIFICAÇÃO DO MODELO DE 1/2 CARRO COM 2EIXOS

O modelo de 1/2 carro é aplicado ao problema de um veículo com 2 eixos e suspensões independentes e passivas que trafega sobre um terreno com um degrau (GOGA & KLUCIK, 2012).

A excitação de base corresponde a uma função degrau com altura igual a 0,1m. A primeira roda do veículo atinge o degrau em  $t=1s$ , conforme EQ. 4.1.

$$Z_{r1}(t) = \begin{cases} 0.1, t \geq 1 \\ 0, \text{outros casos} \end{cases} \quad (4.1)$$

A aplicação da excitação de base na roda traseira do modelo segue o prescrito nas EQ. 3.10 e 3.11.

Portanto, ao avaliar este veículo (GOGA & KLUCIK, 2012), a função de excitação de base sobre a primeira roda, EQ. 3.9, é substituída pela EQ. 4.1. Esta é a única mudança

necessária no modelo de 1/2 carro detalhado no CAPÍTULO 3 para simular o terreno com um degrau.

Na TAB. 4.1 estão dispostos os parâmetros e seus respectivos valores utilizados para verificação do modelo de 1/2 carro com dois eixos, que por sua vez é exibido pela FIG. 4.1.

Tabela 4.1–Valores dos parâmetros do modelo de 1/2 carro com 2 eixos.

Parâmetro		Símbolo	Valor	
Chassi	Massa	m	1.794kg	
	Momento de Inércia em relação ao CG	$I_y$	3.443,05kg.m <sup>2</sup>	
Roda Dianteira	Suspensão	Constante Rigidez da suspensão	$K_1$	66.824,2N/m
		Coeficiente de Amortecimento	$C_1$	1.190Ns/m
	Posição	Posição em relação ao CG	$l_1$	1,27m
	Pneu	Constante de Rigidez	$K_{w1}$	200.000N/m
		Massa	$m_{w1}$	87,15kg
Roda Traseira	Suspensão	Constante Rigidez da suspensão	$K_2$	18.615N/m
		Coeficiente de Amortecimento	$C_2$	1.000Ns/m
	Posição	Posição em relação ao CG	$l_2$	-1,713 <sup>b</sup> m
	Pneu	Constante de Rigidez	$K_{w2}$	200.000N/m
		Massa	$m_{w2}$	140,04kg
Velocidade do veículo		v	60 <sup>c</sup> km/h	

Os resultados do modelo proposto e da referência (GOGA & KLUCIK, 2012) são observados nas FIG.4.2 a FIG.4.5, onde são apresentadas a aceleração vertical do CG e a aceleração angular do chassi, bem como os deslocamentos da roda dianteira e traseira.

Os resultados da simulação assinalam que a maior aceleração do CG do chassi ocorre quando a roda dianteira do veículo atinge o degrau, FIG. 4.2. Em seguida todo o veículo sobe no degrau e as oscilações do CG do chassi são amortecidas, tendendo a condição de equilíbrio mecânico dinâmico ao longo do tempo. Resultados análogos são observados para a aceleração angular do chassi, FIG. 4.3, e para o deslocamento das rodas, FIG. 4.4 e 4.5. Contudo,

<sup>b</sup> Valores negativos localizam-se no semieixo negativo do sistema inercial

<sup>c</sup> Conversão para [m/s] realizada pelo código computacional

observa-se na FIG. 4.5 que o maior deslocamento da roda traseira se dá quando esta atinge o degrau, apresentando, portanto, um atraso quando comparado com o maior deslocamento da roda dianteira, FIG. 4.4. Este comportamento é condizente com o fenômeno físico investigado, indicando que a simulação está qualitativamente coerente.

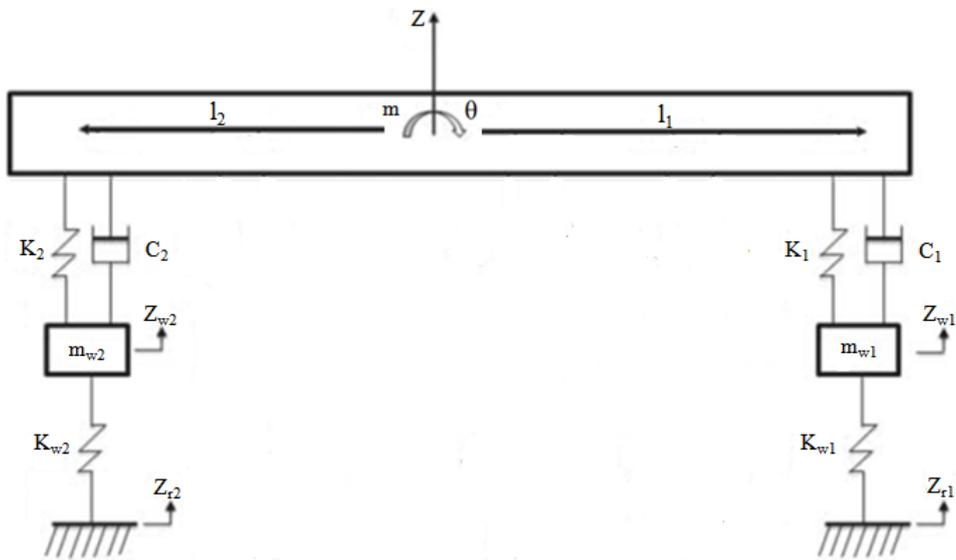


Figura 4.1 – Modelo de 1/2 carro com 2 eixos (Fonte: Adaptado de ATA, 2014)

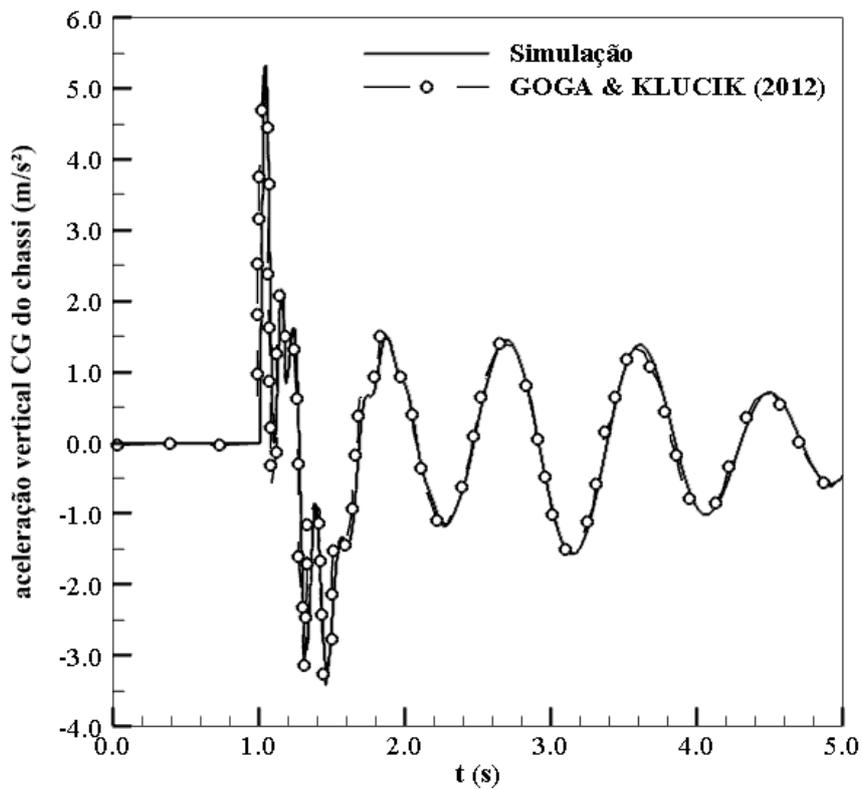


Figura 4.2 – Aceleração vertical do CG do chassi

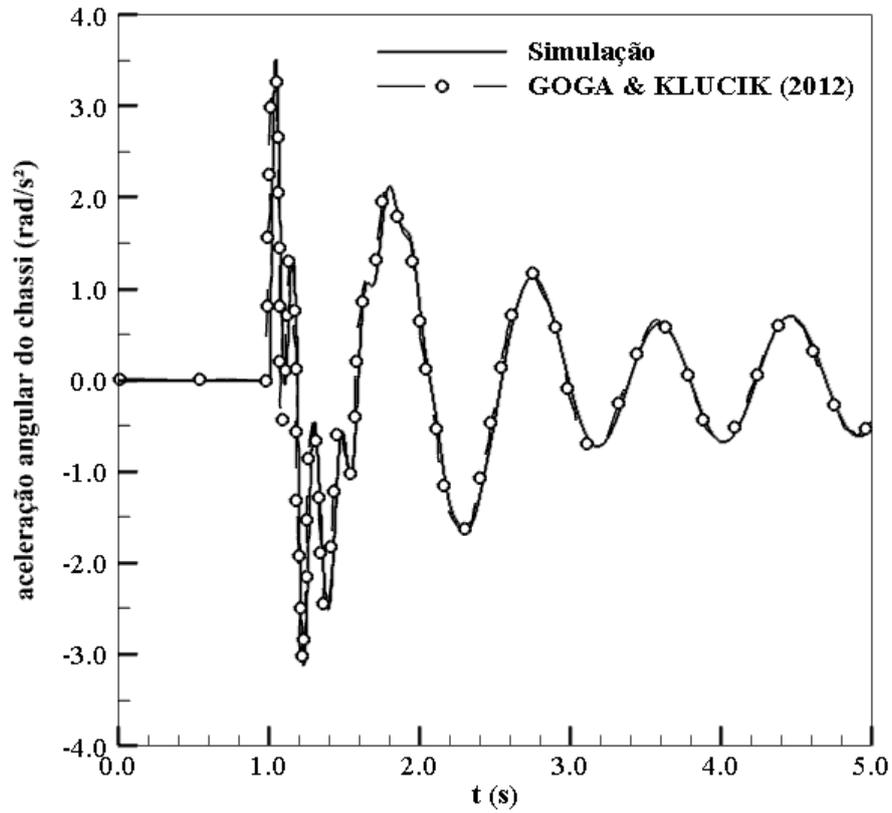


Figura 4.3 – Aceleração angular do chassi

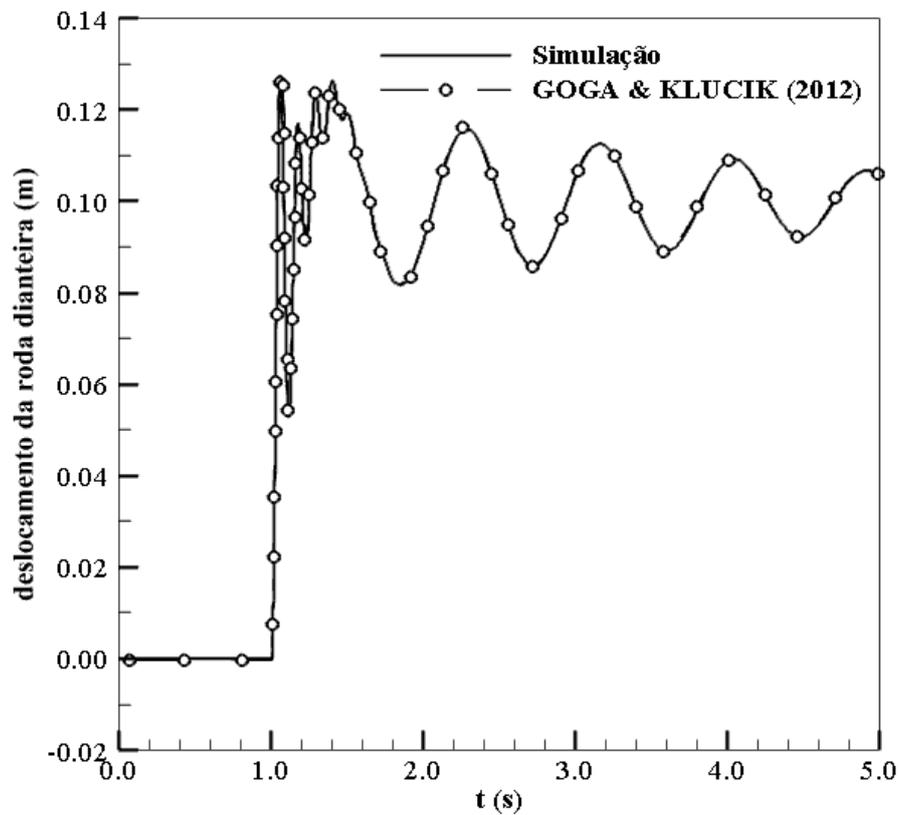


Figura 4.4 – Deslocamento da roda dianteira

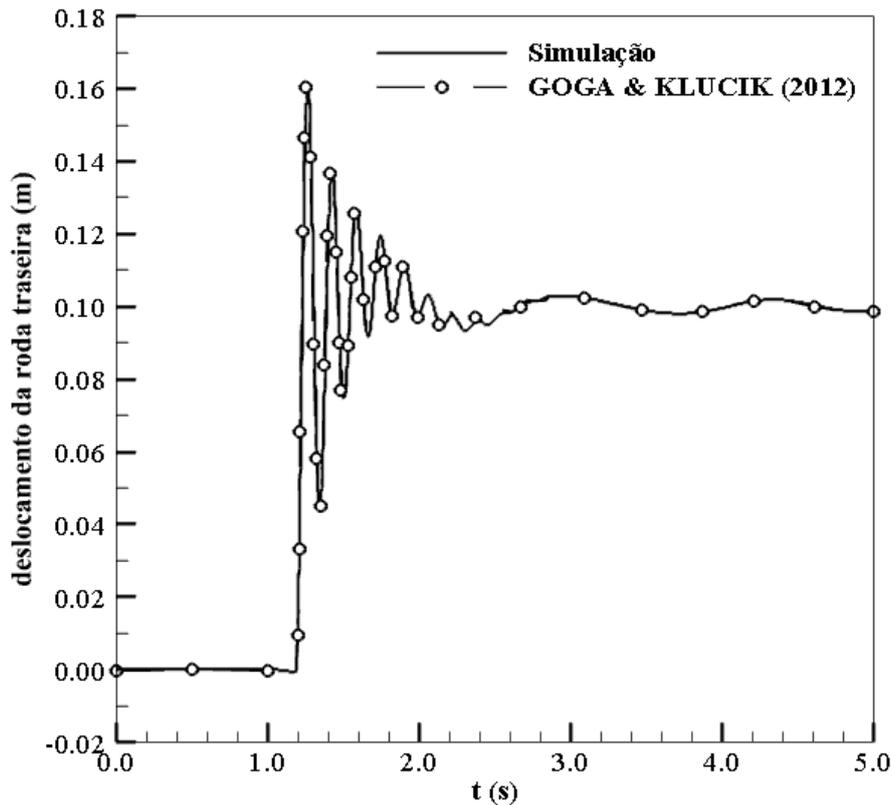


Figura 4.5 – Deslocamento da roda traseira

A congruência dos resultados da simulação com os resultados de GOGA & KLUCIK (2012) indicam que o algoritmo em *SciLab*<sup>®</sup> está corretamente implementado. Logo, a simulação está quantitativamente adequada, não tendo amplificado erros numéricos.

## 4.2 VERIFICAÇÃO DO MODELO DE ½ CARRO COM 5 EIXOS

Nesta seção, o modelo de ½ carro simula um veículo sobre lagartas com 5 eixos, com suspensões passivas e independentes, semelhante ao M113, o qual trafega em um terreno com uma lombada (ATA, 2014). A suspensão de cada roda é composta por uma mola e um amortecedor, conforme pode ser observado no modelo físico ilustrado na FIG. 4.6.

Três tipos de terreno são estudados, cada um com uma lombada, segundo EQ. 3.9 e 3.11, diferindo apenas na largura do obstáculo ( $w$ ), cujos parâmetros são apresentados na TAB. 4.2. Além disso, três velocidades do veículo também são avaliadas, possibilitando a investigação dos efeitos combinados da largura da lombada e da velocidade do veículo, parâmetros estes presentes na excitação de base.

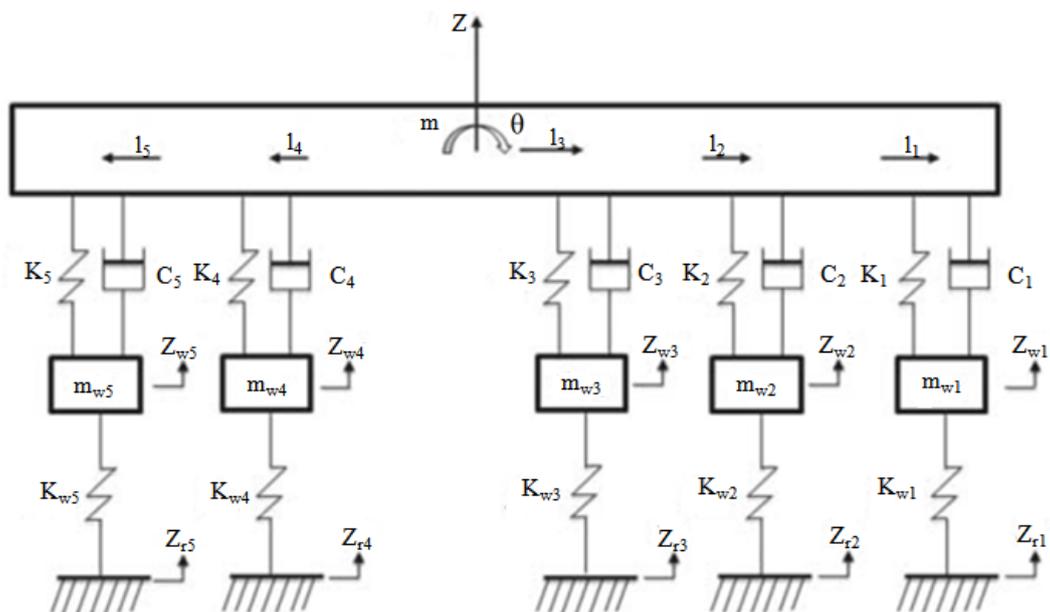


Figura 4.6 – Modelo de 1/2 carro com 5 eixos (ATA, 2014) (Fonte: ATA, 2014)

Tabela 4.2–Valores dos parâmetros do terreno (ATA, 2014).

Símbolo	Descrição		Valores
$h$	Altura do obstáculo		0,1m
$w_i$	Largura do obstáculo	Baixa	0,5m
		Média	2,5m
		Alta	5m
$v_i^d$	Velocidade do Veículo	Baixa	10km/h
		Média	40km/h
		Alta	60km/h

Os valores dos parâmetros do modelo referentes ao chassi e ao conjunto suspensão-roda estão, respectivamente, listados na TAB. 4.3 e 4.4.

Os resultados do modelo proposto e da referência (ATA, 2014) podem ser observados nas FIG. 4.7 a 4.24, onde são apresentadas a aceleração vertical do CG e aceleração angular do chassi, para as diferentes velocidades do veículo e larguras do obstáculo.

<sup>d</sup> Conversão para [m/s] realizada pelo código computacional

Tabela 4.3 – Valores dos parâmetros do modelo de ½ carro com 5 eixos - chassi

Parâmetro	Símbolo	Valor
Massa	m	5.109kg
Momento de Inércia em relação ao CG	$I_y$	12.856kg.m <sup>2</sup>

Tabela 4.4 – Valores dos parâmetros do modelo de ½ carro com 5 eixos – conjunto suspensão-roda.

Parâmetro		Símbolo	Eixos				
			1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
Suspensão	Rigidez da suspensão	$K_i$	104.000N/m				
	Coefficiente de Amortecimento	$C_i$	22.520Ns/m				
Posição em relação ao CG		$l_i$	1,35m	0,69m	0,02m	-0,66m	-1,32 <sup>e</sup> m
Rodas	Massa	$m_{wi}$	113,5kg				
	Rigidez da suspensão	$K_{wi}$	613.000N/m				

As FIG. 4.7 e 4.8 permitem identificar a passagem de cada eixo sobre a lombada, correspondendo aos cinco pontos de mínimo com valores inferiores a  $-7m/s^2$  na FIG. 4.7 e aos cinco pontos de máximo na FIG. 4.8. É relevante destacar na FIG. 4.8 que as maiores acelerações angulares estão associadas à passagem do primeiro e do quinto eixo sobre a lombada. Portanto, em concordância com a teoria, quanto maior distanciamento do eixo em relação ao CG do chassi maior a aceleração angular. Além disso, passados os efeitos da excitação de base sobre o veículo, o mesmo recupera a condição de equilíbrio mecânico dinâmico.

A partir dos resultados verifica-se que o aumento da velocidade do veículo, como esperado, diminui o intervalo de tempo para aquisição de dados, requerendo, portanto, sistemas de aquisição de dados mais rápidos. Outros efeitos decorrentes do aumento da velocidade veicular são: a diminuição dos valores dos máximos associado à passagem dos

<sup>e</sup> Valores negativos localizam-se no semieixo negativo do sistema inercial

eixos sobre o obstáculo nos resultados de aceleração vertical do CG do chassi e a diminuição dos valores dos mínimos associados à passagem dos eixos sobre a lombada nos resultados de aceleração angular do chassi. Estes efeitos combinados indicam que, para as velocidades avaliadas, quanto maior a velocidade do veículo, mais difícil será estimar os parâmetros de cada uma das suspensões do veículo. Logo, os resultados indicam que as análises de estimativa de parâmetros devem ser realizadas com o veículo a baixa velocidade.

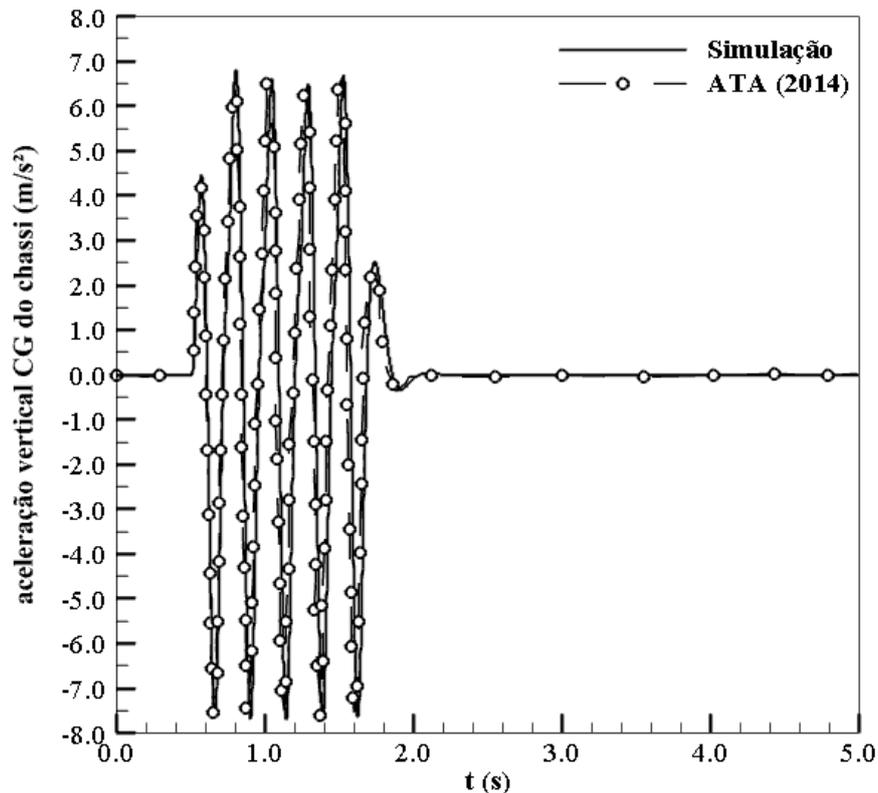


Figura 4.7 – Aceleração vertical do CG do chassi ( $v=10\text{km/he}$   $w=0,5\text{m}$ )

Observa-se que para os valores de largura da lombada iguais a 2,5m e 5m não é possível identificar nas curvas de aceleração vertical do CG do chassi e de aceleração angular do chassi a passagem de cada eixo sobre a lombada. Este fato pode ser explicado por ser a maior distância entre eixos do veículo igual a 2,67m. Portanto, 4 dos 5 eixos do veículo estarão sobre a lombada com largura igual a 2,5m e todos os eixos do veículo estarão sobre a lombada com largura igual a 5m. Em outras palavras, nestas situações a excitação de base não atuará eixo a eixo como foi observado com a lombada de largura igual a 0,5m.

Neste sentido, a lombada com largura menor que a menor distância entre eixos é recomendada para realizar os experimentos para a estimativa de parâmetros, pois permitirá

mais facilmente quantificar os parâmetros da suspensão de cada eixo.

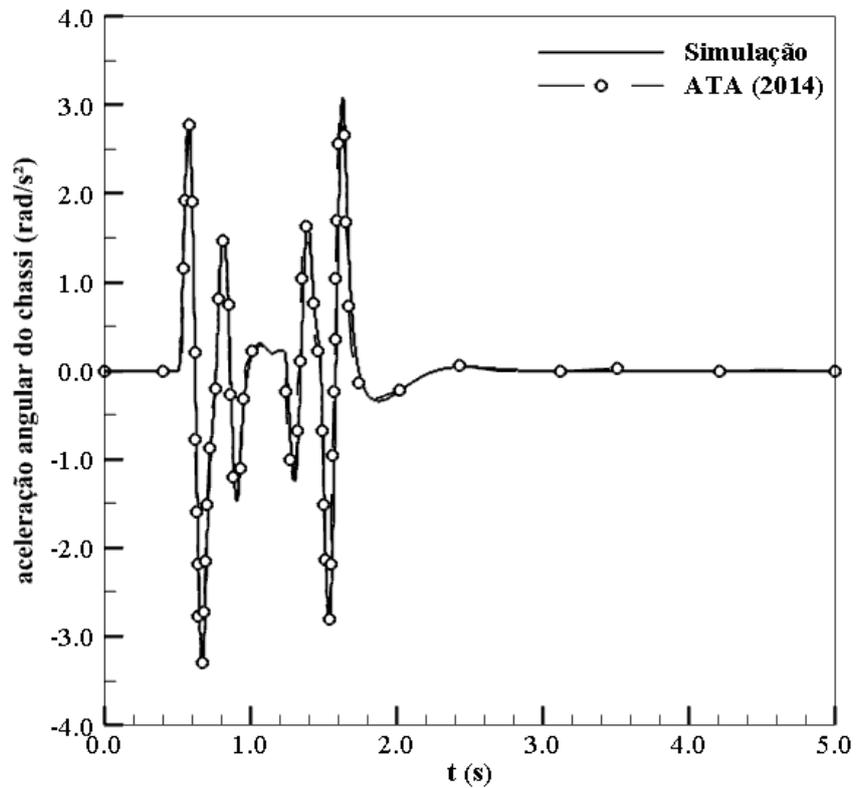


Figura 4.8 – Aceleração angular do chassi( $v=10\text{km/he}$   $w=0,5\text{m}$ )

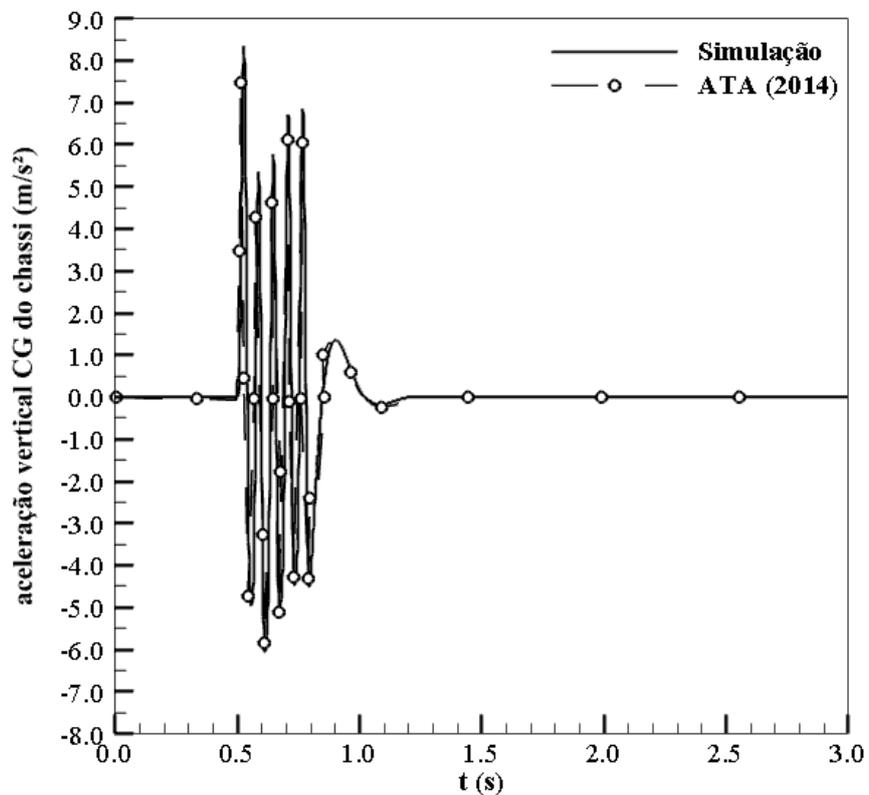


Figura 4.9 – Aceleração vertical do CG do chassi( $v=40\text{km/he}$   $w=0,5\text{m}$ )

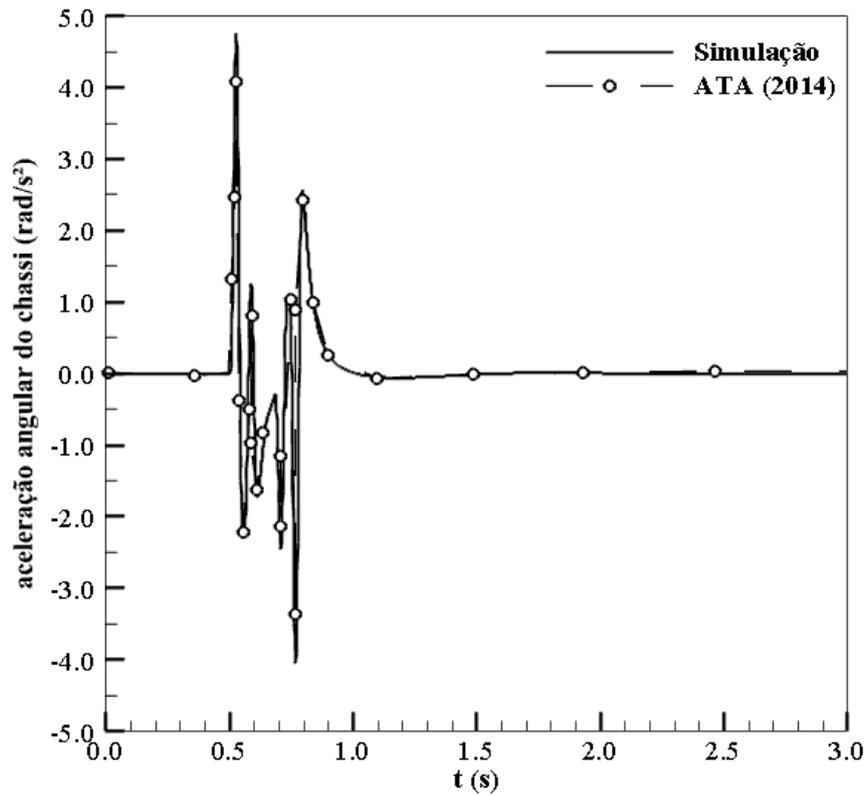


Figura 4.10 – Aceleração angular do chassi ( $v=40\text{km/h}$   $w=0,5\text{m}$ )

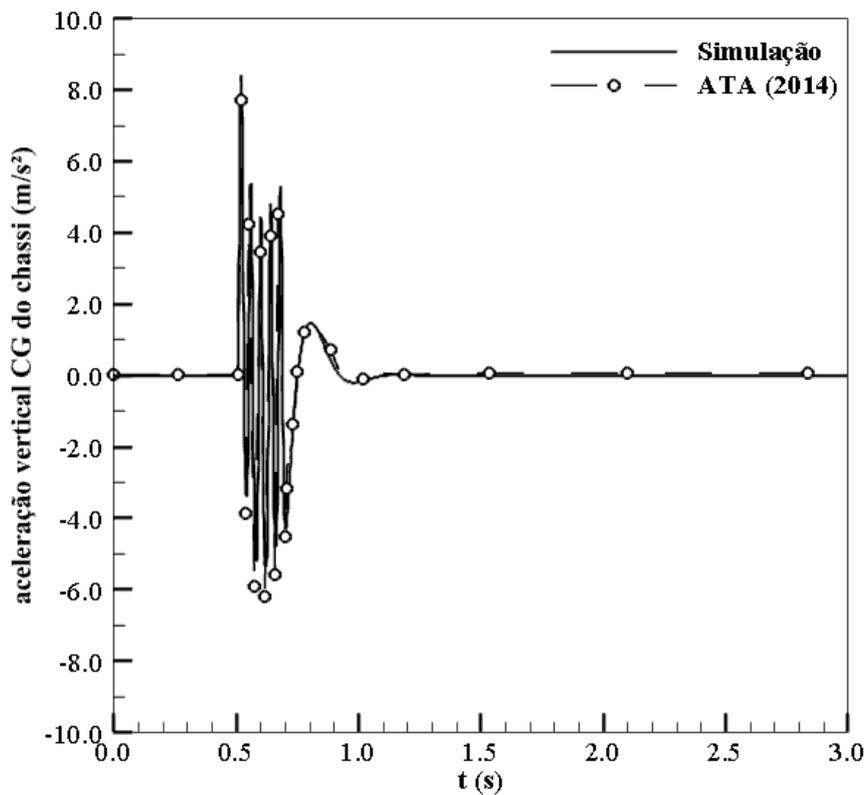


Figura 4.11 – Aceleração vertical do CG do chassi ( $v=60\text{km/h}$   $w=0,5\text{m}$ )

O aumento da largura das lombadas também implica na redução dos valores máximos da aceleração vertical do CG. Outro aspecto associado ao aumento da largura da lombada é o aumento do número de oscilações do chassi quando se compara as FIG.4.7, 4.13 e 4.19. Isto se deve ao fato que a 10km/h e com a menor largura de lombada, o veículo descreve completamente o ciclo de subida e descida do chassi a cada excitação de base. Porém, com  $w=2,5m$  e  $5m$ , o ciclo de oscilação do chassi não é concluído antes que a roda subsequente receba a excitações de base. Ou seja, antes do movimento de descida do chassi ser concluído um novo carregamento é introduzido no chassi, obrigando-o a interromper o movimento de descida e a recuperar o movimento de subida. O mesmo comportamento pode ser observado comparando o efeito da largura da lombada e a aceleração vertical do chassi com o veículo a 40km/h e a 60km/h.

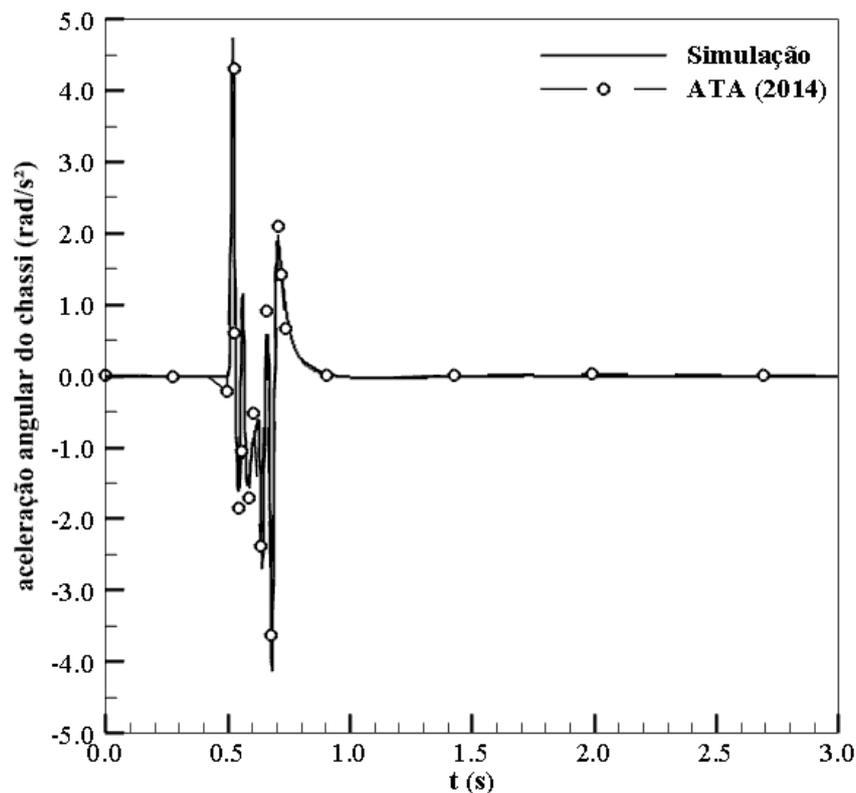


Figura 4.12 – Aceleração angular do chassi ( $v=60km/h$   $w=0,5m$ )

Com respeito à aceleração angular do chassi, pode-se afirmar que o aumento da largura da lombada diminui o número das oscilações do chassi. O movimento de rotação do chassi em torno do CG pode ser analisado comparando-se as FIG. 4.8, 4.14 e 4.20. Nestas figuras, o aumento da largura da lombada tem um efeito de reduzir a amplitude de oscilação, posto que

a excitação de base impõe um carregamento com uma frequência mais baixa, permitindo então, que a suspensão filtre o carregamento imposto pelo terreno. Também é importante observar que a ação do terreno sobre os eixos do veículo presentes no semieixo positivo do sistema inercial favorecem o movimento de rotação positivo. Contudo, quando esta ação é efetuada sobre os eixos do veículo presentes no semieixo negativo do sistema inercial, o movimento de rotação negativo é favorecido.

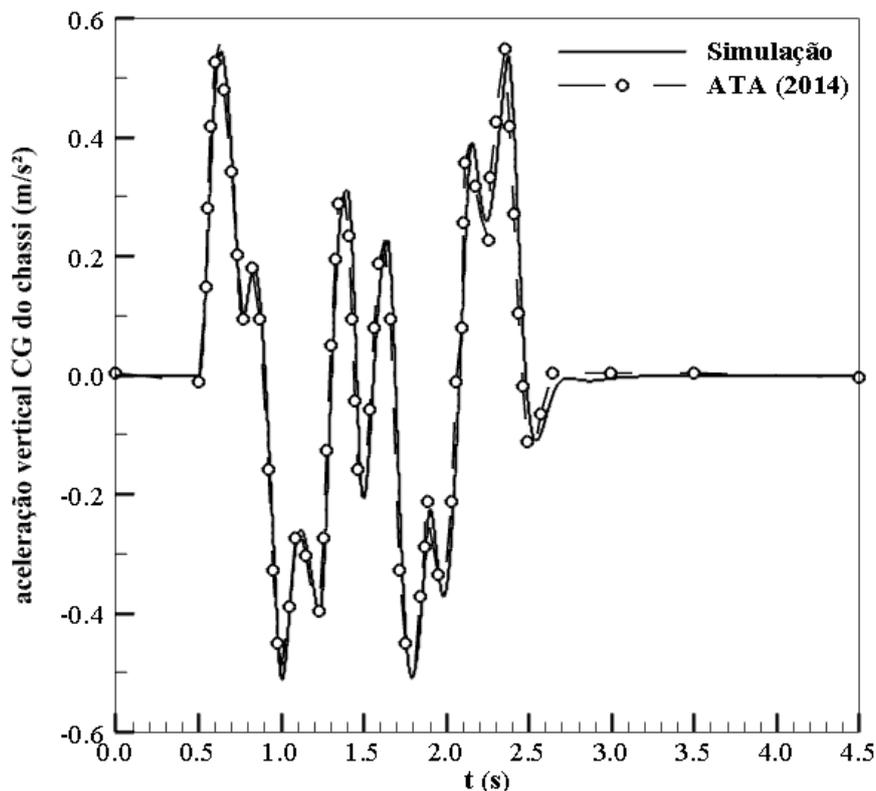


Figura 4.13 – Aceleração vertical do CG do chassi ( $v=10\text{km/h}$  e  $w=2,5\text{m}$ )

O aumento da velocidade reduz as oscilações na aceleração angular do chassi, pois conforme EQ. 3.11, o intervalo de tempo para o contato roda-excitação de base é menor.

Outra maneira de analisar este fenômeno é refletir sobre a situação limite, ou seja, quando a velocidade do veículo tende a infinito. Observa-se que o atraso na aplicação da excitação de base em cada roda tende a zero e, portanto o terreno atua simultaneamente em todas as rodas, dificultando o deslocamento angular do chassi.

As FIG. 4.23 e 4.24 ilustram a pior situação estudada para a estimativa de parâmetros. As curvas, nestas figuras, apresentam poucas oscilações, não revelando assim uma assinatura característica do terreno sobre cada suspensão.

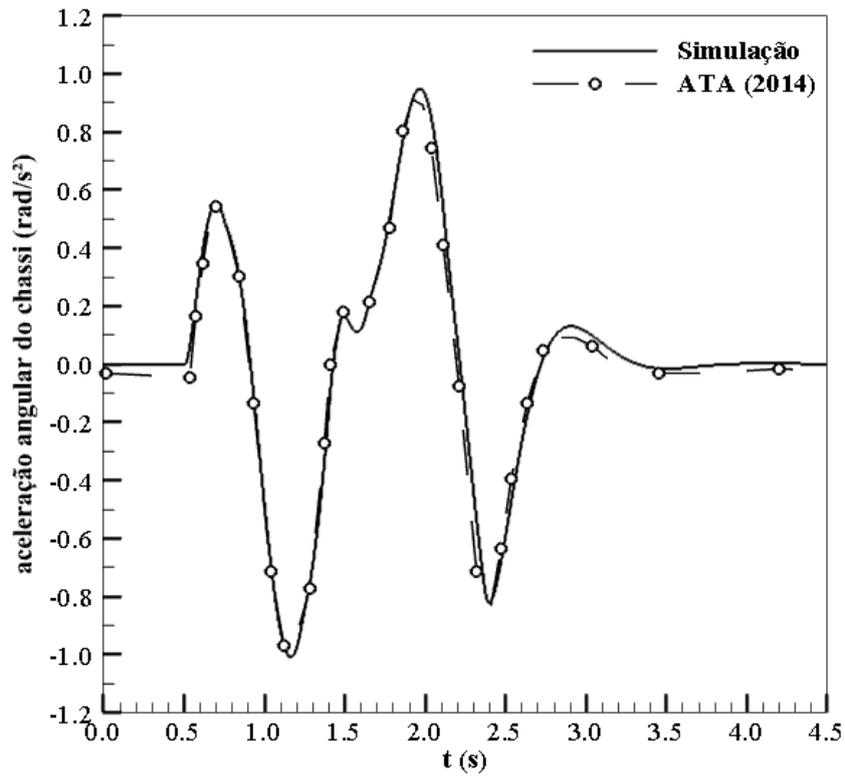


Figura 4.14 – Aceleração angular do chassi ( $v=10\text{km/he}$   $w=2,5\text{m}$ )

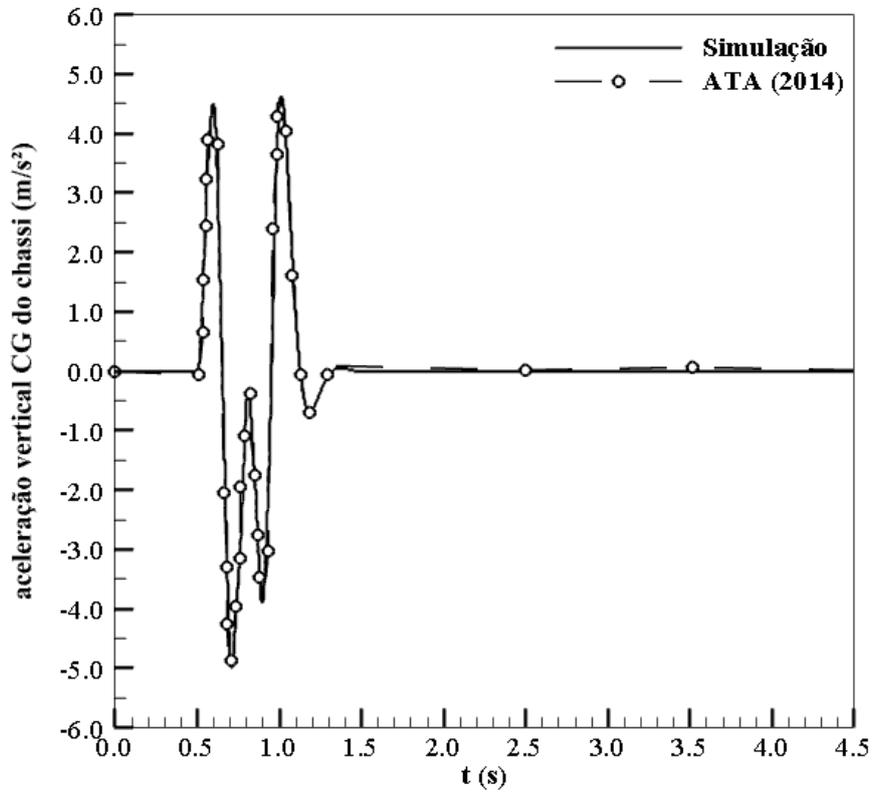


Figura 4.15– Aceleração vertical do CG do chassi ( $v=40\text{km/he}$   $w=2,5\text{m}$ )

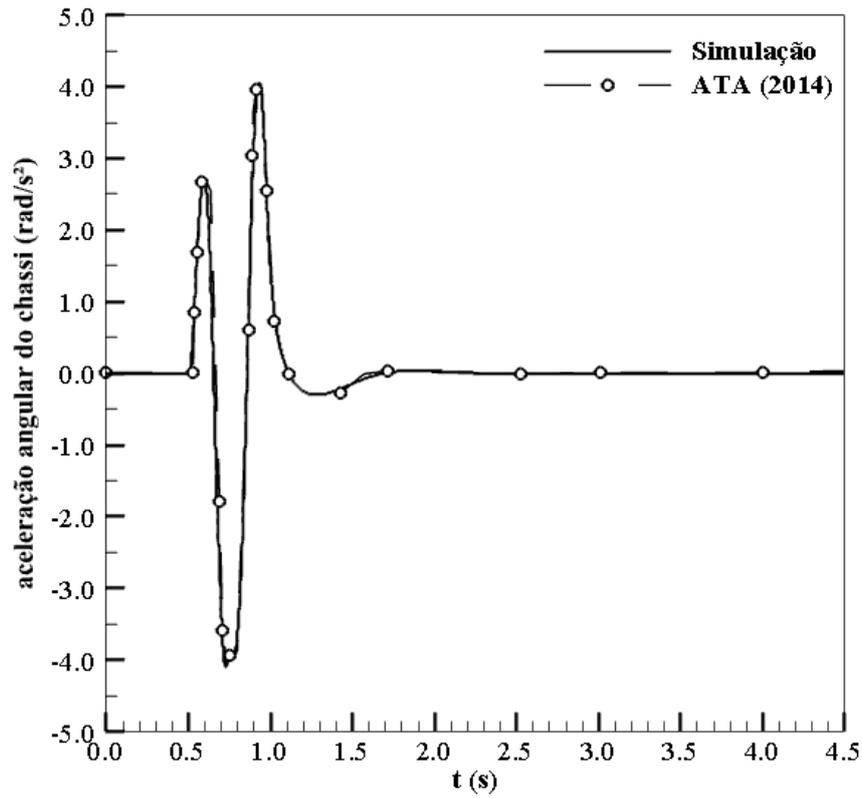


Figura 4.16 – Aceleração angular do chassi ( $v=40\text{km/h}$   $w=2,5\text{m}$ )

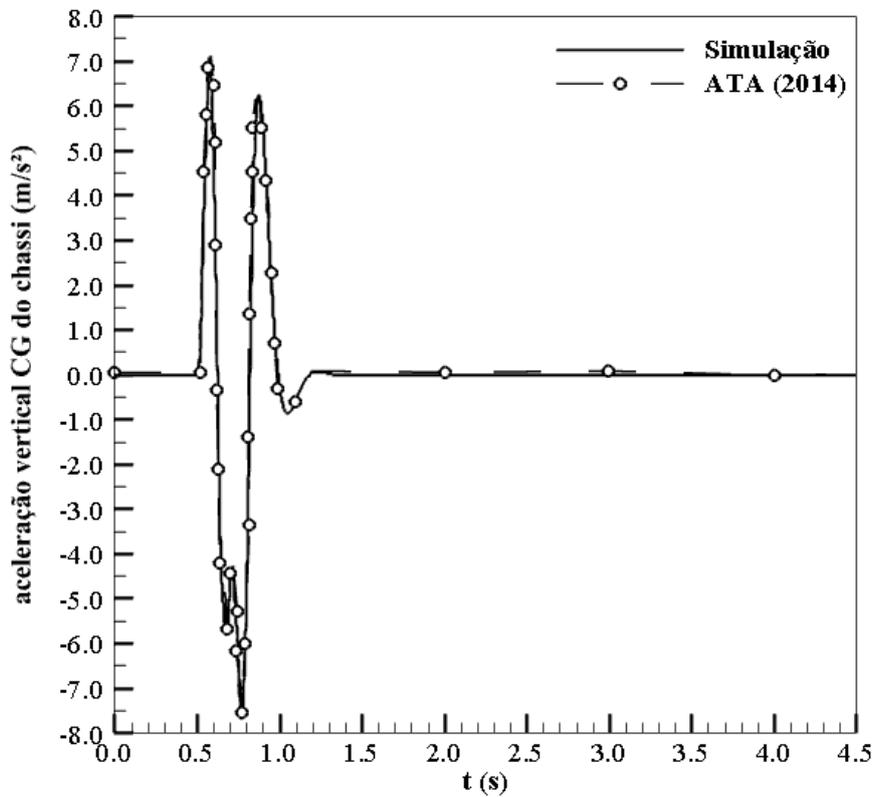


Figura 4.17 – Aceleração vertical do CG do chassi ( $v=60\text{km/h}$   $w=2,5\text{m}$ )

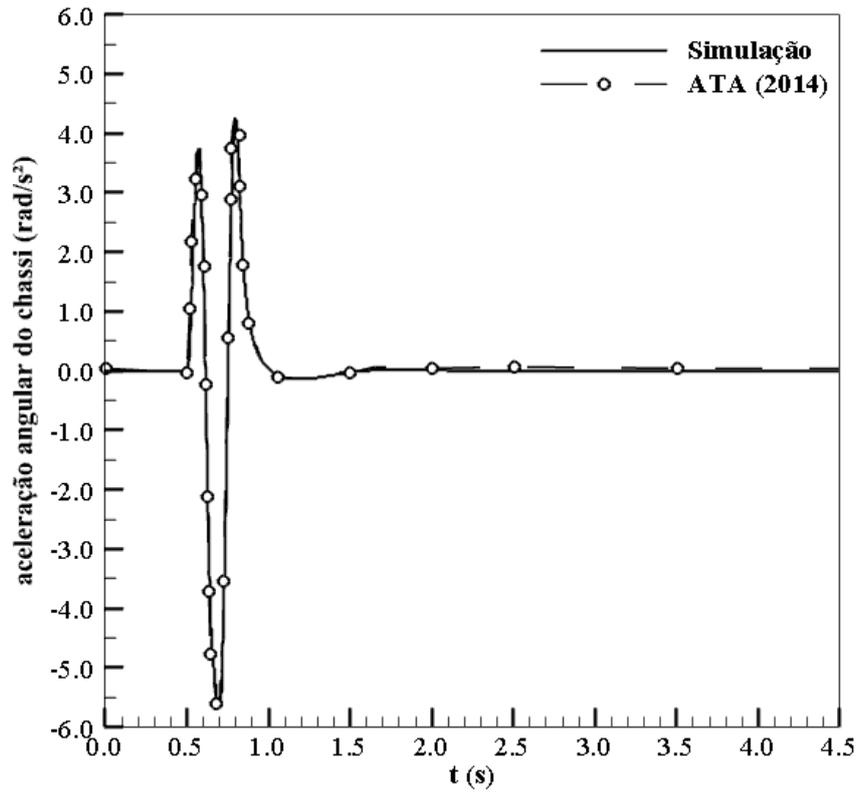


Figura 4.18 – Aceleração angular do chassi ( $v=60\text{km/h}$   $w=2,5\text{m}$ )

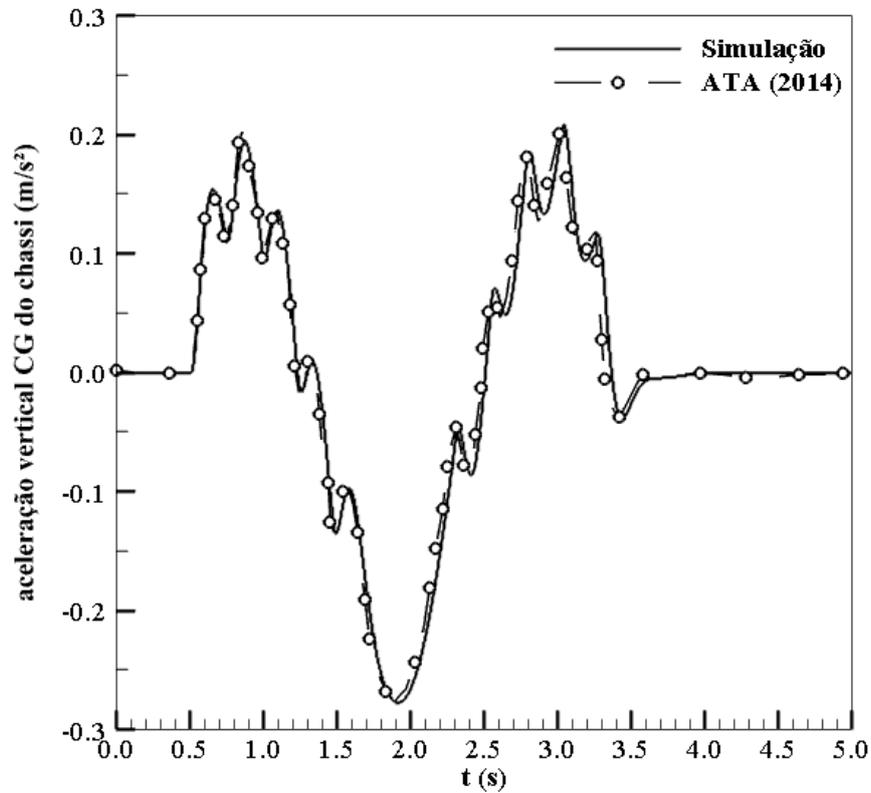


Figura 4.19–Aceleração vertical do CG do chassi ( $v=10\text{km/h}$   $w=5\text{m}$ )

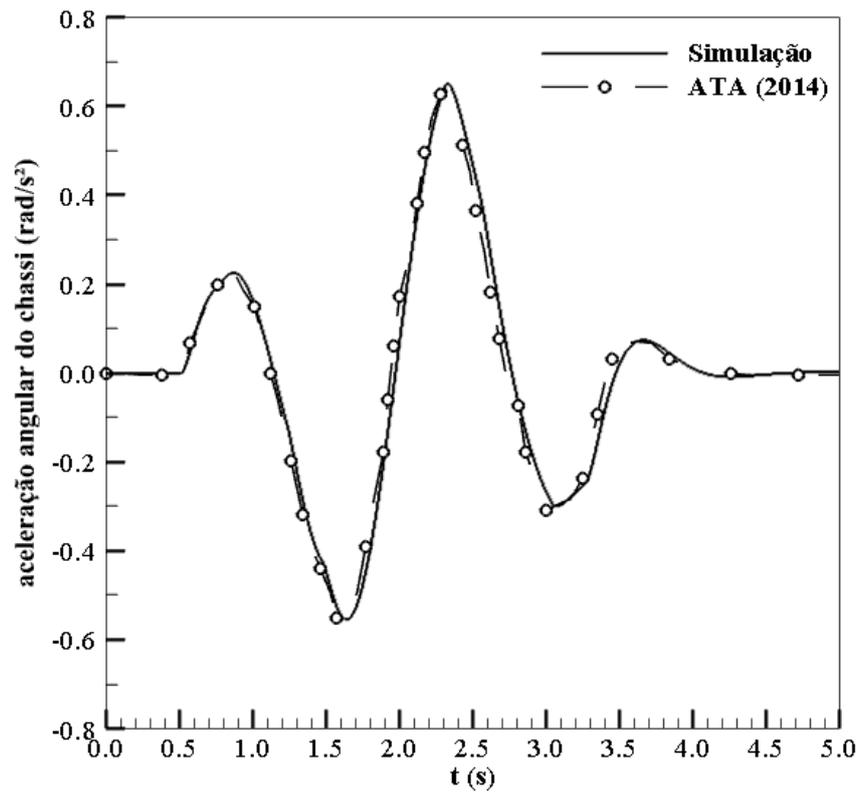


Figura 4.20 – Aceleração angular do chassi (v=10km/he w=5m)

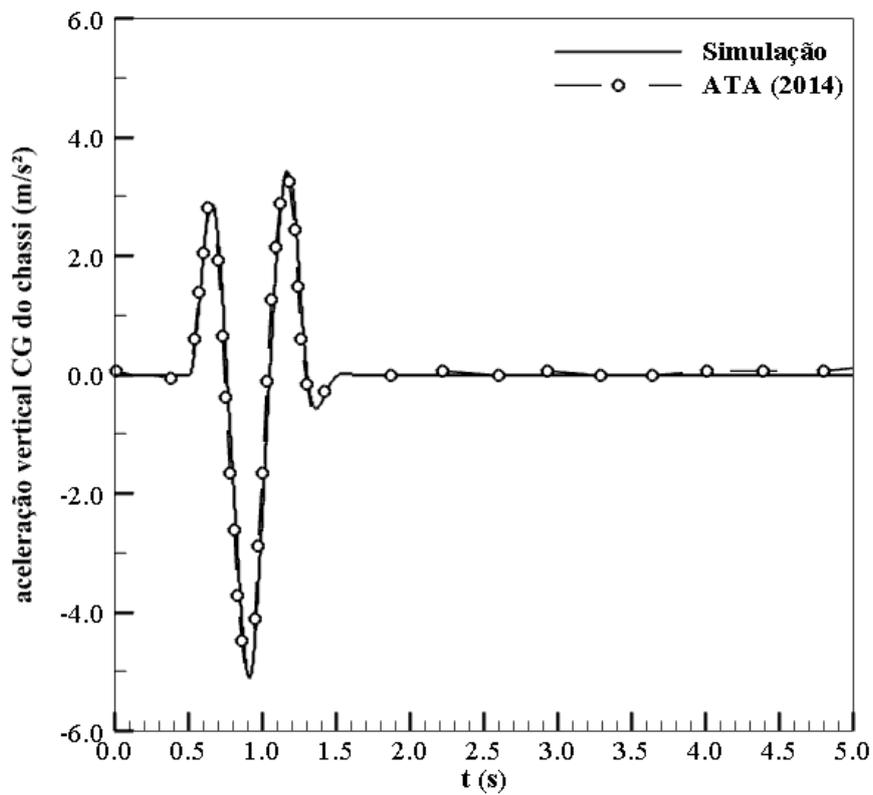


Figura 4.21 – Aceleração vertical do CG do chassi (v=40km/he w=5m)

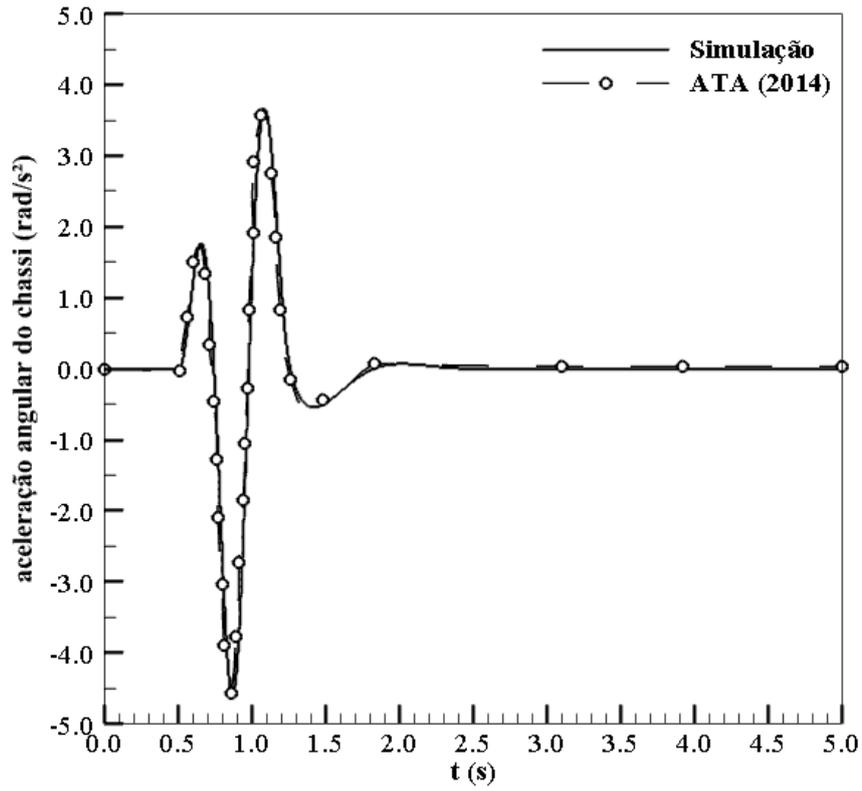


Figura 4.22 – Aceleração angular do chassi (v=40km/he w=5m)

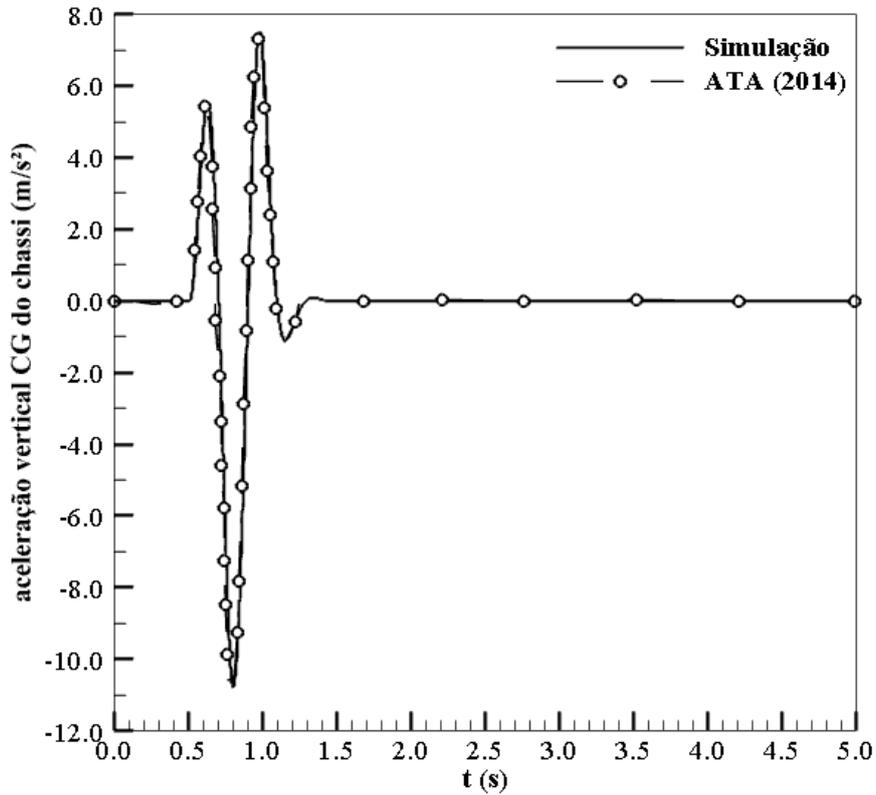


Figura 4.23 – Aceleração vertical do CG do chassi (v=60km/he w=5m)

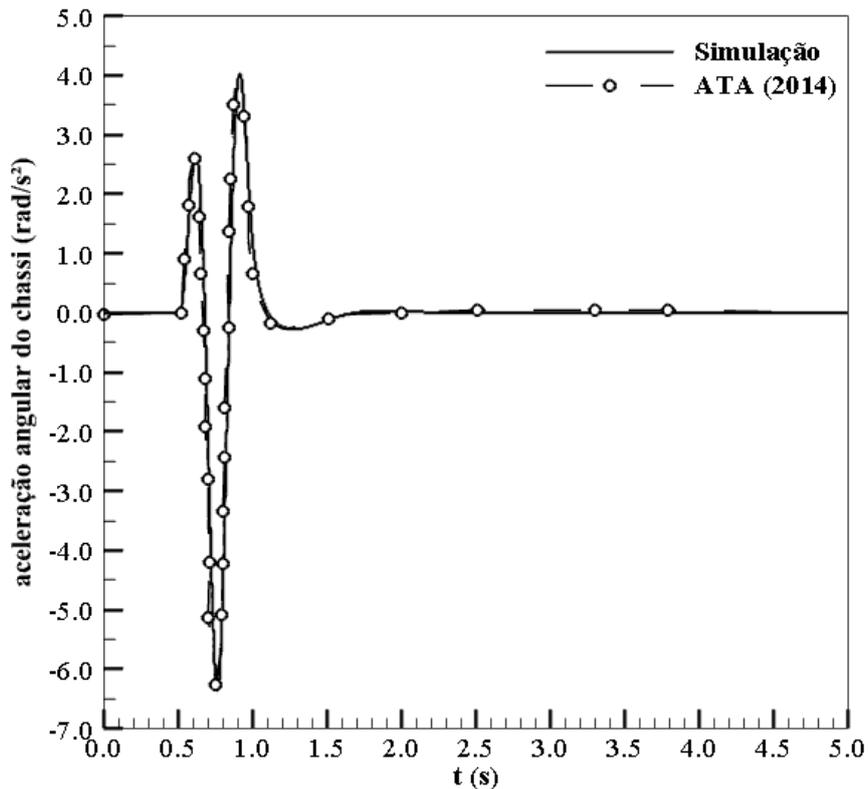


Figura 4.24 – Aceleração angular do chassi ( $v=60\text{km/h}$  e  $w=5\text{m}$ )

A congruência dos resultados do modelo com os da referência (ATA, 2014) indica que o algoritmo em *SciLab*<sup>®</sup> está corretamente implementado. O mesmo pode ser afirmado quanto à solução numérica, a qual não amplificou os erros das aproximações numéricas inerentes ao método de Runge-Kutta de 4<sup>a</sup> ordem.

### 4.3 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e confrontados com ambas as referências é possível concluir que o algoritmo em *SciLab*<sup>®</sup> está corretamente implementado. Além disso, o modelo mostrou-se capaz de reproduzir resultados com diferentes tipos de terreno, velocidades do veículo e número de eixos.

As pequenas diferenças encontradas nos resultados residem nas aproximações numéricas, mas principalmente nos erros introduzidos durante a coleta dos dados das referências.

Constatou-se que o problema inverso será mais facilmente resolvido caso os experimentos sejam realizados a baixa velocidade e com o veículo trafegando em um terreno com uma lombada com largura menor que a menor distância entre eixos do veículo.

A correta implementação do modelo de  $\frac{1}{2}$  carro e de sua solução numérica garantem que a cinemática do chassi e dos eixos do veículo sejam simuladas adequadamente, e assim possa prover as medidas das acelerações vertical do CG e angular do chassi a serem utilizadas no problema inverso de estimativa de parâmetros da suspensão.

## 5 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS: COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO E RIGIDEZ DA SUSPENSÃO

Neste capítulo são estimados os parâmetros: rigidez da suspensão (K) e coeficiente de amortecimento da suspensão (C), referentes a um veículo militar com 5 eixos e suspensões passivas iguais (ATA, 2014, ATA & OYADIJI, 2014), cujo modelo de ½ carro é apresentado no CAPÍTULO 3 e verificado no CAPÍTULO 4.

A rigidez da suspensão (K) e o coeficiente de amortecimento da suspensão (C) são estimados por meio das técnicas de otimização "*Particle Swarm Optimization*" – PSO (COLAÇO *et al*, 2006) e "*Random Restricted Window*" - R2W (BIHAIN *et al*, 2012).

As soluções numéricas foram realizadas em um computador com configuração: Intel® Dual Core 1,87 GHz, 4GB de memória RAM e sistema operacional de 32 Bits.

O problema inverso de estimativa de parâmetros utiliza medidas simuladas, doravante denominadas por pseudoexperimentais, da aceleração vertical do CG ( $\ddot{Z}_{exp}$ ) (m/s<sup>2</sup>) e da aceleração angular ( $\ddot{\theta}_{exp}$ ) (rad/s<sup>2</sup>) do chassi. Essas medidas são obtidas a partir da solução do problema direto que utiliza os valores exatos dos parâmetros da suspensão, presentes nas TAB. 4.3 e 4.4. Além disso, a velocidade do veículo é igual a 10km/h e a excitação de base, conforme EQ. 3.9 e 3.10, possui largura igual 0,5m e altura de 0,1m.

As medidas pseudoexperimentais ( $\ddot{Z}_{exp}$  e  $\ddot{\theta}_{exp}$ ) são comparadas com as medidas obtidas a partir das soluções do problema direto, geradas por cada indivíduo que compõem a população dos métodos de otimização evolucionários ( $\ddot{Z}$  e  $\ddot{\theta}$ ).

O sistema de equações diferenciais de segunda ordem que compõem o problema direto (CAPÍTULO 3) é integrado numericamente pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem, cujo passo de integração é igual a 0,001s.

As discrepâncias entre as acelerações verticais do CG do chassi obtidas a partir de cada indivíduo e as pseudoexperimentais são adimensionalizadas segundo a EQ. 5.1. Procedimento análogo é adotado com relação às acelerações angulares, segundo a EQ. 5.2.

$$\Delta\ddot{Z}_{adm} = (\ddot{Z} - \ddot{Z}_{exp}) / \max|\ddot{Z}_{ref}| \quad (5.1)$$

$$\Delta\ddot{\theta}_{adm} = (\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_{exp}) / \max|\ddot{\theta}_{ref}| \quad (5.2)$$

onde  $\max|\ddot{Z}_{ref}|$  e  $\max|\ddot{\theta}_{ref}|$  são, respectivamente, os valores máximos absolutos obtidos por ATA (2014) para a aceleração vertical do CG e aceleração angular do chassi.

O procedimento de adimensionalização permite a compatibilização das escalas da aceleração vertical do CG e da aceleração angular do chassi em uma única função objetivo.

Assim, a função objetivo baseada na discrepância quadrática de  $\Delta\ddot{\theta}_{adm}$  e  $\Delta\ddot{Z}_{adm}$ , pode ser escrita segundo a EQ. 5.3, em que n é o número de medidas geradas para a aceleração vertical do CG e aceleração angular do chassi.

$$F(K, C) = \frac{1}{2n} \sqrt{\sum_{i=1}^n [(\Delta\ddot{Z}_{adm})^2 + (\Delta\ddot{\theta}_{adm})^2]} \quad (5.3)$$

Para a realização das estimativas dos parâmetros, primeiramente é recomendável a realização da análise de sensibilidade dos mesmos, a fim de saber quantos parâmetros podem ser estimados simultaneamente e em qual domínio do tempo isso é possível.

O espaço viável dos parâmetros a serem estimados é limitado com base em valores obtidos em referências bibliográficas. Assim, pretende-se evitar as soluções irrealis. Procedendo dessa forma é possível escolher os valores dos limites inferiores e superiores para cada um dos parâmetros a serem estimados.

As TAB. 5.1 e 5.2 exibem, respectivamente, os valores dos parâmetros encontrados nas referências para veículos sobre rodas e sobre lagartas.

Tabela 5.1 – Referências para veículos sobre rodas e os valores para cada parâmetro

<b>Rigidez da suspensão (N/m)</b>	<b>Coefficiente de Amortecimento (Ns/m)</b>	<b>Referência</b>
480.000	24.000	Sun <i>et al</i> (2009)
163.300	9.000	Hosseainloo <i>et al</i> (2012)
66.824	1.190	Goga & Klucik (2012)
18.615	1.000	Goga & Klucik (2012)

Tabela 5.2 – Referências para veículos sobre lagartas e os valores para cada parâmetro

<b>Rigidez da suspensão (N/m)</b>	<b>Coefficiente de Amortecimento (Ns/m)</b>	<b>Referência</b>
2.400.000	30.000	<i>Zeng e tal (2011)</i>
145.675	22.520	Ravishankar & Sujatha (2007)
115.675	22.520	Ravishankar & Sujatha (2007)
104.000	22.520	Ata & Oyadiji (2014)
100.000	10	Wang (1998)
37.500	1.000	Kadir <i>et al</i> (2012)
85.615	22.520	Ravishankar & Sujatha (2007)
10.000	1.000	Liang <i>et al</i> (2014)

Os limites considerados para a rigidez da suspensão e para o coeficiente de amortecimento no problema inverso em tela estão dispostos na TAB. 5.3.

Tabela 5.3 – Limites para cada parâmetro a ser otimizado nos métodos PSO e R2W

<b>Parâmetro</b>	<b>Limites</b>	
	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
<b>Coefficiente do Amortecedor (Ns/m)</b>	1000	30000
<b>Rigidez da suspensão (N/m)</b>	10000	145675

## 5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade permite avaliar como a rigidez da suspensão e o coeficiente de amortecimento da suspensão influenciam as medidas desejadas: a aceleração vertical do CG e a aceleração angular do chassi.

Caso os parâmetros apresentem baixo coeficiente de sensibilidade suas estimativas são de difícil execução, pois mesmo com grandes variações, não ocorrem alterações significativas nas medidas. Ou seja, mesmas medidas podem ser obtidas para uma larga faixa de valores dos parâmetros (OZISIK & ORLANDE, 2000).

A partir da análise de sensibilidade também é possível identificar o melhor tempo para a estimativa de parâmetros. Isto é feito com base nos instantes de tempo em que os parâmetros são mais sensíveis e linearmente independentes (OZISIK & ORLANDE, 2000).

A EQ 5.4 apresenta uma aproximação numérica de segunda ordem para a avaliação do coeficiente de sensibilidade (OZISIK & ORLANDE, 2000), sendo a mesma empregada neste trabalho.

$$J_{ij} = \left[ \ddot{D}_i(P_1, P_j + \Delta P_j, P_n) - \ddot{D}_i(P_1, P_j - \Delta P_j, P_n) \right] / 2\Delta P_j \quad (5.4)$$

onde  $\ddot{D}_i$  representa as medidas pseudoexperimentais, aceleração vertical do CG ( $\ddot{Z}$ ) (m/s<sup>2</sup>) e aceleração angular do chassi ( $\ddot{\theta}$ ) (rad/s<sup>2</sup>);  $P_j$  os parâmetros a serem estimados e  $J_{ij}$  os coeficientes de sensibilidade.

Porém, os coeficientes de sensibilidade avaliados segundo a EQ. 5.4, apresentam suas próprias magnitudes e unidades. Assim, para comparar seus efeitos sobre as respostas medidas, os mesmos necessitam ser redimensionalizados a mesma unidade, sendo chamados por coeficientes de sensibilidade modificados. Esses são calculados multiplicando o coeficiente de sensibilidade pelo valor do parâmetro, segundo EQ. 5.5 e 5.6, respectivamente, para a aceleração vertical do CG e aceleração angular do chassi (OZISIK & ORLANDE, 2000, SANTOS *et al*, 2002).

$$X_{ij} \text{ (m/s}^2\text{)} = P_j \times J_{ij} \quad (5.5)$$

$$Y_{ij} \text{ (rad/s}^2\text{)} = P_j \times J_{ij} \quad (5.6)$$

As FIG. 5.1 e 5.2 exibem, respectivamente, os coeficientes de sensibilidade modificados para a aceleração vertical do CG e aceleração angular do chassi.

Observa-se que os tempos menores que 0,5s representam os instantes que antecedem o encontro com a excitação de base e, portanto, o chassi permanece em equilíbrio mecânico dinâmico. Os tempos maiores a 2s representam os instantes em que cessam os efeitos relevantes da excitação de base sobre o chassi do veículo. Por isso, a faixa de tempo a ser considerada para a estimativa de parâmetros é definida como  $0,5s \leq t \leq 2s$ .

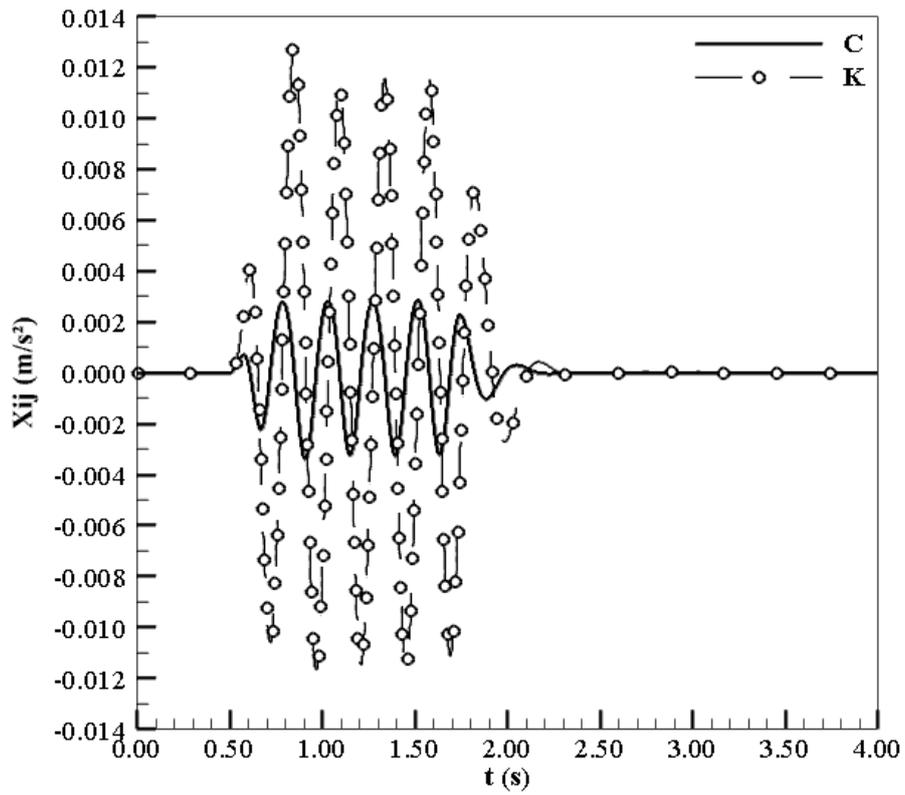


Figura 5.1 –  $X_{ij}$  - Aceleração vertical do CG do Chassi

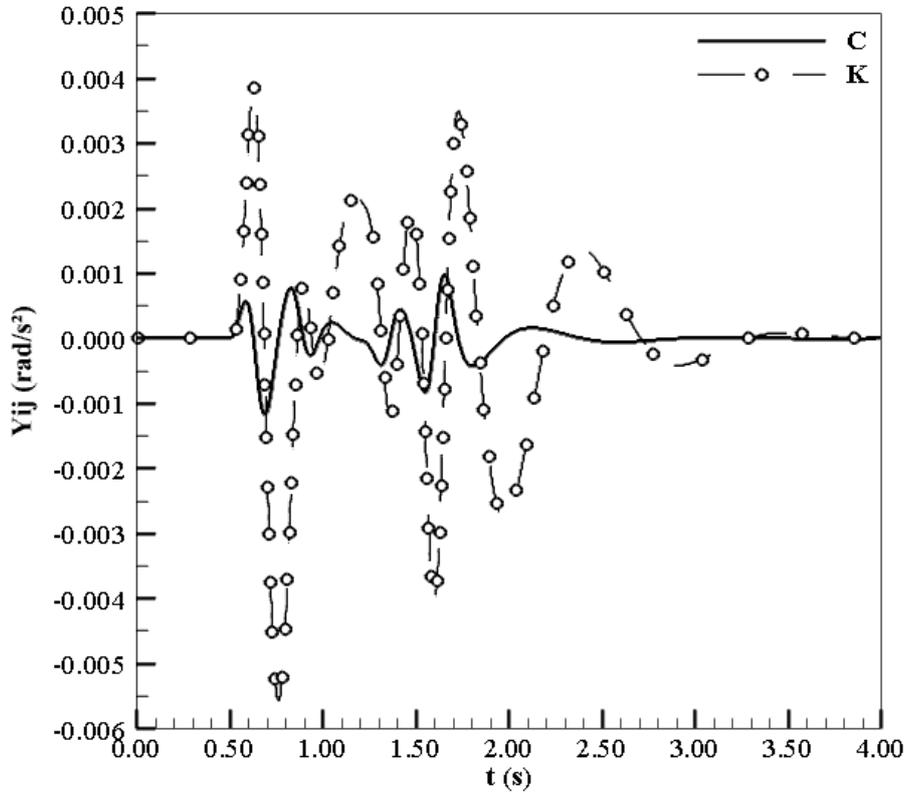


Figura 5.2 –  $Y_{ij}$  - Aceleração angular do chassi

O comportamento das curvas da aceleração vertical do CG e da aceleração angular do chassi permite concluir acerca da possibilidade de estimar os dois parâmetros simultaneamente, pois são linearmente independentes. Porém, as magnitudes dos coeficientes de sensibilidade modificados indicam que pode haver dificuldades para a realização das estimativas de parâmetros, não sendo recomendados os métodos determinísticos. Posto que, os métodos determinísticos requerem a inversão da matriz de identificação  $|J^T J|$  em suas equações durante o processo iterativo (OZISIK & ORLANDE, 2000).

A análise de sensibilidade é realizada de maneira análoga para a faixa de valores delimitada pelo valor máximo e mínimo de cada parâmetro (TAB. 5.3). Assim, pode-se garantir a realização das estimativas dos parâmetros a qualquer valor pertencente a essa faixa.

A análise detalhada para toda a faixa de valores dos parâmetros não é apresentada neste trabalho, porém chega-se a mesma conclusão quanto à realização das estimativas dos parâmetros apresentada para os valores dos parâmetros analisados.

## 5.2 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

A verificação dos métodos de otimização PSO e R2W, ora conduzida, não considera erros experimentais nas medidas pseudoexperimentais.

Cada um destes métodos de otimização possui constantes empíricas que devem ser ajustadas para cada tipo de problema. Assim, no próximo passo as constantes empíricas são determinadas por meio da avaliação do valor da função objetivo, na condição de ótimo, pelo tempo computacional e pela discrepância entre os parâmetros estimados e os parâmetros corretos (os quais são conhecidos *a priori*).

Nestas avaliações foi adotado como critério de convergência o valor da função objetivo menor ou igual a  $10^{-6}$ , ou 500 gerações das populações, segundo EQ. 5.7.

$$F(K, C) \leq 10^{-6} \text{ ou } N_{\text{gerações}} \leq 500 \quad (5.7)$$

Também se faz necessário escolher o número de indivíduos mais adequado em suas populações. Nesse sentido, são estudadas as populações de 10, 20 e 40 indivíduos.

O método R2W possui como parâmetro empírico a ser ajustado, o fator de restrição  $\delta$  que define o tamanho da janela de busca pela solução ótima. Inicialmente considera-se

$0,1 \leq \delta \leq 0,9$ , porém a geração populacional máxima foi atingida com estimativas insatisfatórias. Assim, para obter estimativas satisfatórias é necessário maior limite para a geração máxima. Entretanto, esse fato acarretará em maior tempo computacional e por isso, tal estratégia não é indicada.

Segundo BIHAIN *et al*, (2012), a busca por melhores estimativas, ou seja, uma busca mais refinada, deve considerar fatores de restrição ainda menores. Assume-se então,  $0,001 \leq \delta \leq 0,008$ .

Após vários testes, verifica-se que para  $\delta \leq 0,003$  é necessário estabelecer maior limite para a geração máxima, a fim obter resultados satisfatórios das estimativas. Logo, tais valores não são recomendados, pois também dispendem de maior tempo computacional.

Assim, conforme observado por BIHAIN *et al*, (2012), ao reduzir o valor de  $\delta$ , melhores estimativas podem ser geradas, porém maior é o tempo computacional ou o número de gerações de populações.

A TAB. 5.4 exhibe os melhores resultados estimados, aos quais estão associados: o número de indivíduos da população que os gerou, o valor da função objetivo, o tempo computacional e o número de gerações. Observa-se que são realizadas três simulações para cada  $\delta$  e para cada população, face às características randômicas do método.

Observa-se que todos os valores assumidos por  $\delta$  geram resultados satisfatórios e com erro relativo menor que 1%. Então, a escolha do  $\delta$  adequado considera o menor tempo computacional entre as populações analisadas e o valor ótimo da função objetivo.

Escolhe-se  $\delta=0,008$  com uma população de 20 indivíduos, por ter proporcionado menor tempo computacional e uma estimativa satisfatória para os parâmetros da suspensão do veículo.

Nota-se que um dos testes considerando  $\delta=0,008$  e população de 10 indivíduos possibilitou o melhor resultado entre todos os testes efetuados para todas as combinações, pois possui o menor valor para a função objetivo. Porém, o mesmo apresenta maior tempo computacional quando comparado ao escolhido, assim como todos os testes relacionados com população de 40 indivíduos.

As FIG. 5.3 e 5.4 exibem, respectivamente, os resultados da simulação *versus* a referência para a aceleração vertical do CG e a aceleração angular do chassi, por parâmetros estimados pelo R2W ( $C=22.521\text{N/m}$  e  $K=103.960\text{Ns/m}$ ).

Tabela 5.4 – Resultados estimados empregando o R2W

Pop	$\delta$	C (Ns/m)		K (N/m)		Função Objetivo (F)	Tempo (s)	N° Gerações
		Estimativa	Erro Relativo	Estimativa	Erro Relativo			
10	0,005	22.511	-0,04%	103.915	-0,08%	1,0E-06	3.751	56
	0,005	22.515	-0,02%	103.922	-0,07%	6,0E-07	8.592	128
	<b>0,005</b>	<b>22.528</b>	<b>0,04%</b>	<b>103.933</b>	<b>-0,06%</b>	<b>8,0E-07</b>	<b>1.430</b>	<b>21</b>
	0,006	22.518	-0,01%	103.823	-0,17%	7,0E-07	3.548	52
	0,006	22.523	0,01%	103.791	-0,20%	9,0E-07	2.829	41
	<b>0,006</b>	<b>22.526</b>	<b>0,03%</b>	<b>103.852</b>	<b>-0,14%</b>	<b>9,0E-07</b>	<b>2.334</b>	<b>34</b>
	<b>0,008</b>	<b>22.519</b>	<b>0,00%</b>	<b>103.996</b>	<b>0,00%</b>	<b>8,0E-08</b>	<b>2.582</b>	<b>38</b>
	0,008	22.522	0,01%	103.769	-0,22%	1,0E-06	7.628	112
	0,008	22.523	0,01%	104.099	0,10%	5,0E-07	3.372	48
20	0,005	22.530	0,04%	104.064	0,06%	1,0E-06	5.470	40
	0,005	22.529	0,04%	103.919	-0,08%	9,0E-07	5.461	40
	<b>0,005</b>	<b>22.514</b>	<b>-0,03%</b>	<b>103.912</b>	<b>-0,08%</b>	<b>7,0E-07</b>	<b>824</b>	<b>6</b>
	0,006	22.522	0,01%	103.869	-0,13%	6,0E-07	1.903	14
	<b>0,006</b>	<b>22.521</b>	<b>0,01%</b>	<b>104.026</b>	<b>0,03%</b>	<b>2,0E-07</b>	<b>7.555</b>	<b>55</b>
	0,006	22.529	0,04%	103.995	0,00%	8,0E-07	3.563	26
	<b>0,008</b>	<b>22.521</b>	<b>0,00%</b>	<b>103.960</b>	<b>-0,04%</b>	<b>2,0E-07</b>	<b>1.502</b>	<b>11</b>
	0,008	22.522	0,01%	103.964	-0,03%	2,0E-07	4.793	35
	0,008	22.510	-0,04%	104.011	0,01%	1,0E-06	5.144	37
40	0,005	22.512	-0,04%	103.928	-0,07%	9,0E-07	17.695	65
	<b>0,005</b>	<b>22.521</b>	<b>0,01%</b>	<b>103.997</b>	<b>0,00%</b>	<b>1,0E-07</b>	<b>6.303</b>	<b>23</b>
	0,005	22.515	-0,02%	103.857	-0,14%	8,0E-07	8.467	31
	0,006	22.517	-0,01%	103.889	-0,11%	5,0E-07	7.351	27
	0,006	22.522	0,01%	103.867	-0,13%	6,0E-07	8.190	28
	<b>0,006</b>	<b>22.523</b>	<b>0,02%</b>	<b>103.875</b>	<b>-0,12%</b>	<b>6,0E-07</b>	<b>3.038</b>	<b>11</b>
	0,008	22.518	-0,01%	104.021	0,02%	2,0E-07	4.916	17
	0,008	22.526	0,03%	103.903	-0,09%	7,0E-07	6.306	22
	<b>0,008</b>	<b>22.518</b>	<b>-0,01%</b>	<b>104.021</b>	<b>0,02%</b>	<b>2,0E-07</b>	<b>4.797</b>	<b>17</b>

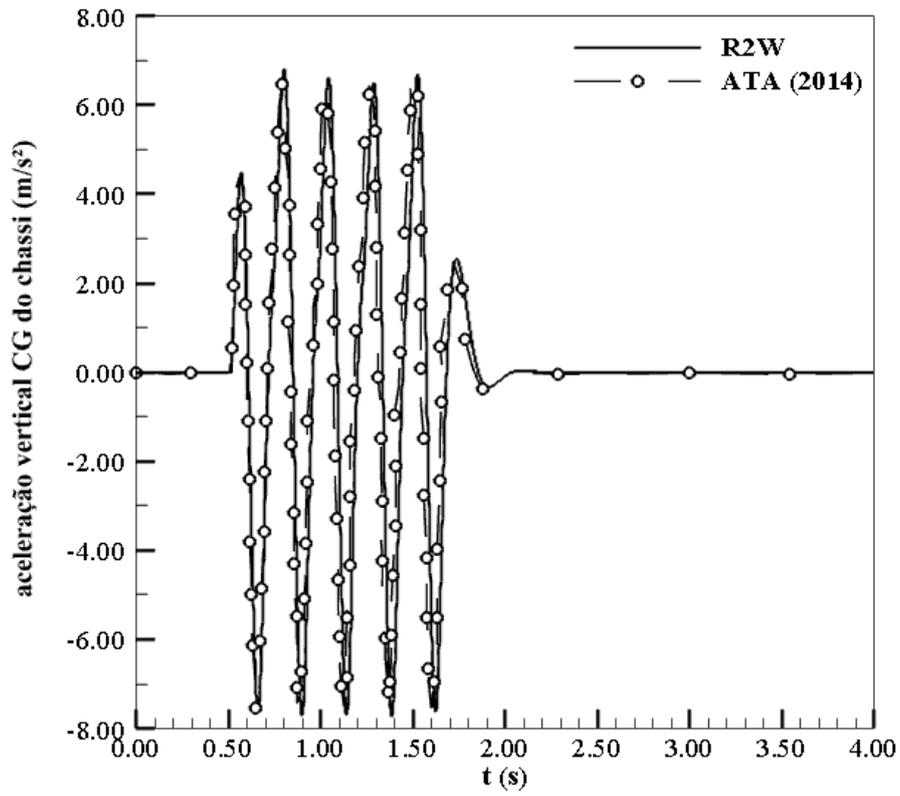


Figura 5.3– Aceleração vertical do CG do chassi – R2W

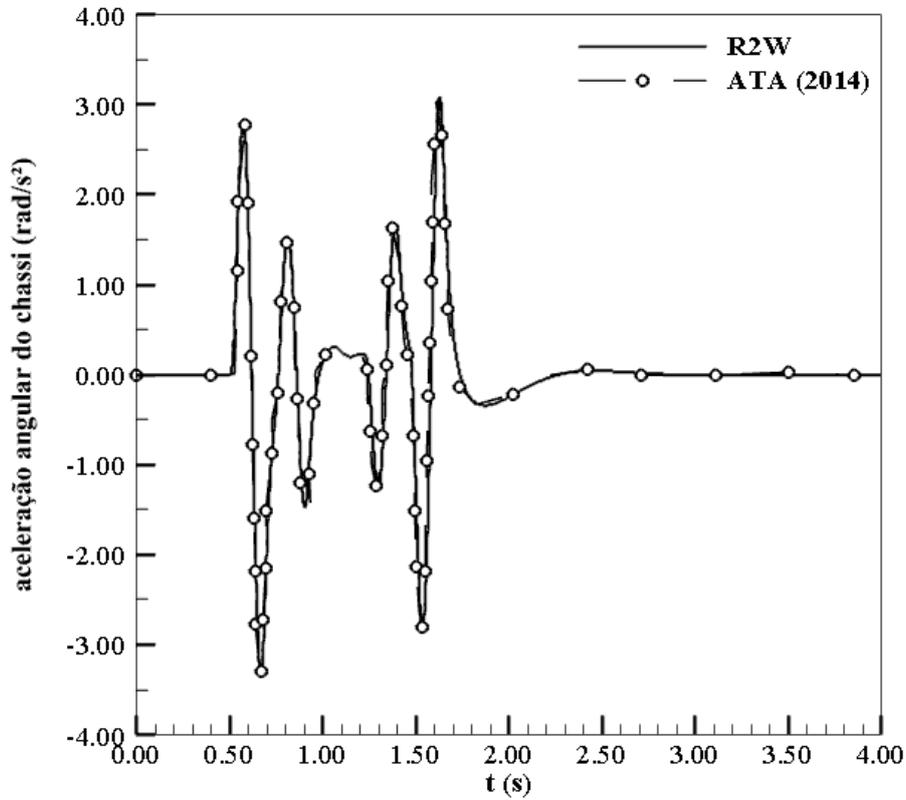


Figura 5.4 – Aceleração angular do chassi – R2W

O próximo passo consiste em ajustar as constantes empíricas do método de otimização PSO. Os termos  $\beta$  e  $\alpha$  são ajustados assumindo  $1 \leq \beta \leq 2$  e  $0 \leq \alpha \leq 1$  (COLAÇO *et al* , 2006).

Na TAB. 5.5 são vistos todos os valores assumidos por  $\beta$  e  $\alpha$ . Da mesma forma que se procedeu na avaliação do método R2W, também são realizados três testes para cada combinação de parâmetros empíricos do método. Porém, a rotina implementada converge somente quando  $\alpha=0,5$  e  $\beta=1,0$ , cujos detalhes podem ser vistos na TAB. 5.6.

Tabela 5.5 – Avaliação da convergência do PSO com diferentes valores de  $\beta$  e  $\alpha$

		$\beta$				
		1,0	1,2	1,5	1,8	2,0
$\alpha$	0,1	Rotina implementada não convergiu				
	0,3					
	0,5	Rotina Convergiu	Rotina implementada não convergiu			
	0,7	Rotina implementada não convergiu				
	1,0					

Tabela 5.6 – Resultados estimados empregando o PSO ( $\alpha=0,5$  e  $\beta=1,0$ )

Pop	C (Ns/m)		K (N/m)		Função Objetivo (F)	Tempo (s)	N° Gerações
	Estimativa	Erro Relativo	Estimativa	Erro Relativo			
10	22.520	0,00%	103.992	-0,01%	4,6E-08	1.185	16
	<b>22.525</b>	<b>0,02%</b>	<b>103.850</b>	<b>-0,14%</b>	<b>7,0E-07</b>	<b>3.106</b>	<b>43</b>
	22.519	0,00%	103.989	-0,01%	8,6E-08	991	13
20	22.510	-0,04%	104.058	0,06%	1,0E-06	2.042	14
	<b>22.521</b>	<b>0,00%</b>	<b>104.039</b>	<b>0,04%</b>	<b>2,0E-07</b>	<b>1.626</b>	<b>11</b>
	22.513	-0,03%	103.922	-0,07%	7,0E-07	5.864	42
40	22.521	0,00%	103.788	-0,20%	9,0E-07	5.759	20
	<b>22.519</b>	<b>-0,01%</b>	<b>104.158</b>	<b>0,15%</b>	<b>6,0E-07</b>	<b>1.372</b>	<b>4</b>
	22.524	0,02%	103.816	-0,18%	8,0E-07	5.492	19

Para comparar o desempenho dos métodos R2W e PSO é necessário que seus parâmetros empíricos e população escolhida resultem em mesma ordem de grandeza para o valor da função objetivo.

Por meio da TAB. 5.6 nota-se que um dos testes realizados possui a função objetivo com valor equivalente ao valor obtido para a escolha realizada para o R2W. Assim, no PSO adota-se  $\beta=1,0$ ,  $\alpha=0,5$  e população com 20 indivíduos.

As FIG. 5.5 e 5.6 exibem, respectivamente, os resultados da simulação *versus* a referência para a aceleração vertical do CG e a aceleração angular do chassi, por parâmetros estimados pelo PSO ( $C=22.521\text{Ns/m}$  e  $K=104.039\text{N/m}$ ).

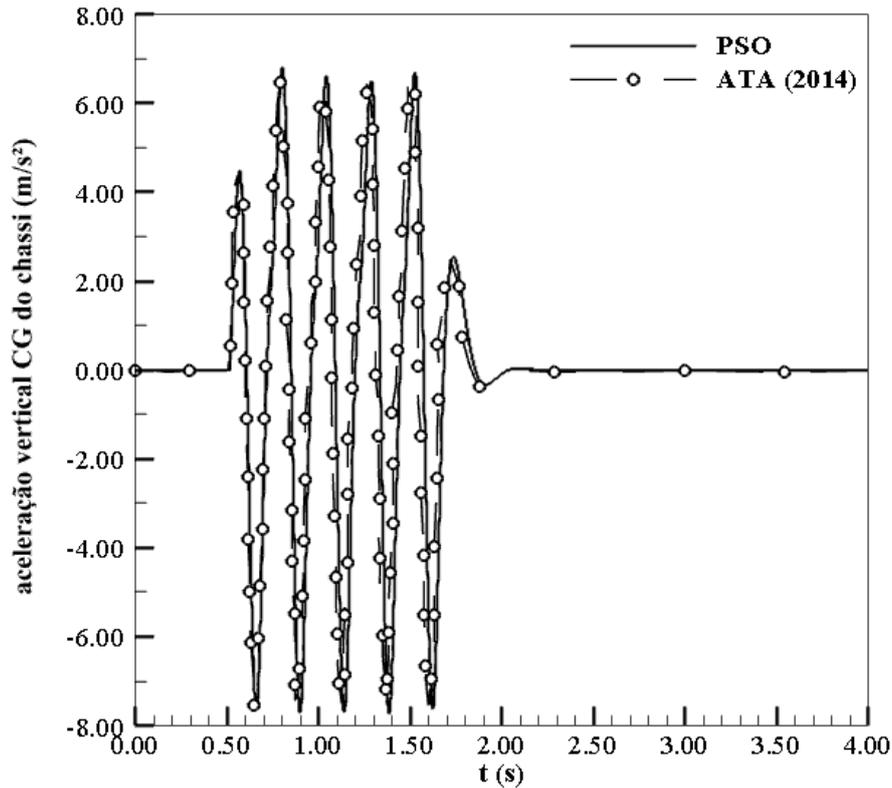


Figura 5.5– Aceleração vertical do CG do chassi – PSO

As FIG. 5.3 a 5.6 e as TAB. 5.4 e 5.6 mostram a congruência dos resultados estimados, empregando o PSO e o R2W, com os resultados e os parâmetros da referência (ATA, 2014). Os valores dos parâmetros estimados em comparação com os valores exatos apresentam erros relativos menores ou iguais a 0,04%. Portanto, verifica-se a viabilidade da adoção dos métodos de otimização estudados no problema inverso proposto de estimativa dos parâmetros da suspensão.

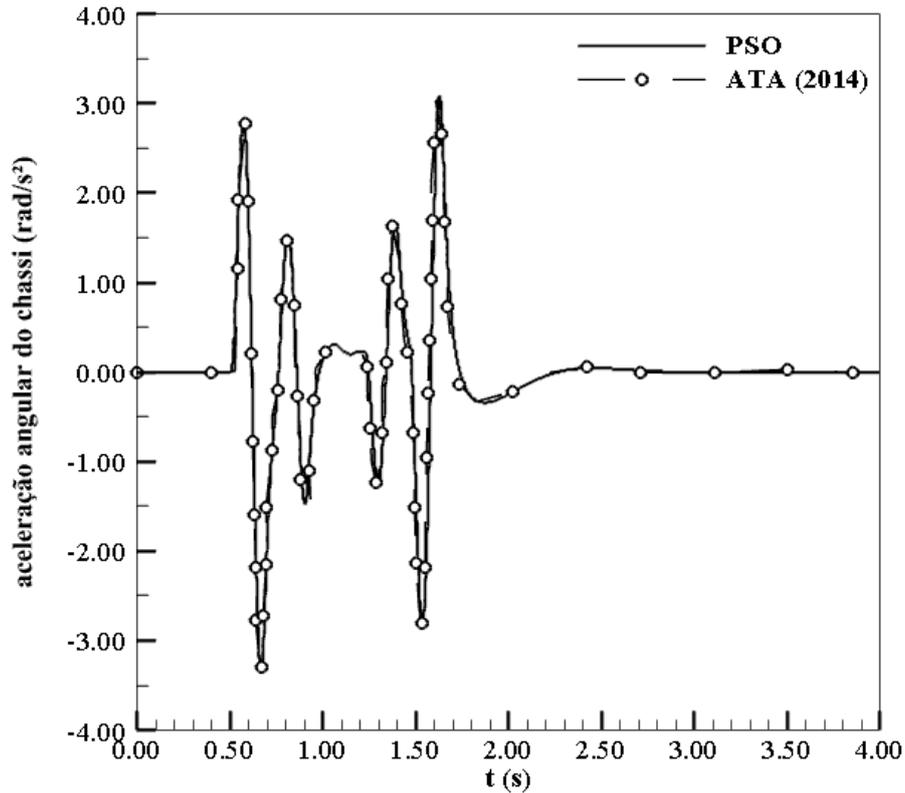


Figura 5.6 – Aceleração angular do chassi – PSO

### 5.3 VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROBLEMA INVERSO

Ao utilizar os parâmetros corretos (conhecidos *a priori*) para gerar as medidas pseudoexperimentais e compará-las com as medidas geradas por cada indivíduo a partir do mesmo modelo físico-matemático, comete-se o crime inverso (WIRGIN, 2008, KAIPIO & SOMERSALO, 2007, CHÁVEZ, 2013). Porém, essa abordagem teve o propósito de verificar se as rotinas de otimização desenvolvidas estão corretamente implementadas.

A fim de atenuar o crime inverso, introduzem-se ruídos nas medidas pseudoexperimentais, conforme MACHADO & ORLANDE (1998). Desse modo, também se torna possível avaliar o desempenho dos métodos de otimização estudados, bem como a metodologia de problema inverso empregada.

A introdução dos ruídos ocorre conforme as EQ. 5.8 e 5.9, para a aceleração vertical do CG e aceleração angular do chassi, respectivamente.

$$\ddot{Z}_{\text{exp}} = \ddot{Z}_{\text{exp}} + \text{rand} \times \text{ruído} \times \text{máx}|\ddot{Z}_{\text{exp}}| \quad (5.8)$$

$$\ddot{\theta}_{\text{exp}} = \ddot{\theta}_{\text{exp}} + \text{rand} \times \text{ruído} \times \text{máx} |\ddot{\theta}_{\text{exp}}| \quad (5.9)$$

Em que rand é a variável randômica, entre 0 e 1, com distribuição normal e média zero, e o ruído assume os valores 1%, 5% e 10%.

Para os casos com ruído nas medidas pseudoexperimentais, o critério de convergência adotado considera o valor da função objetivo menor ou igual a  $10^{-6}$ , ou ainda, a discrepância do valor da função objetivo menor ou igual a 1% durante 60 gerações consecutivas, conforme EQ. 5.10 e EQ. 5.11, respectivamente.

$$F(\mathbf{K}, \mathbf{C}) \leq 10^{-6} \quad (5.10)$$

$$\left| F^k(\mathbf{K}^k, \mathbf{C}^k) - F^{k-1}(\mathbf{K}^{k-1}, \mathbf{C}^{k-1}) \right| / F^{k-1}(\mathbf{K}^{k-1}, \mathbf{C}^{k-1}) \leq 0,01 \quad (5.11)$$

Em seguida, estimam-se o coeficiente de amortecimento e a rigidez da suspensão, empregando o PSO e o R2W na solução do problema inverso. Os resultados dessas avaliações são apresentados nas TAB. 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7 – Resultados para as estimativas dos parâmetros com a introdução dos ruídos nas medidas pseudoexperimentais - PSO

Ruído	C (Ns/m)		K (N/m)		Função Objetivo (F)	Tempo (s)	Nº Gerações
	Estimativa	Erro Relativo	Estimativa	Erro Relativo			
1%	22.526	0,028%	103.997	-0,003%	5,540E-05	4.933	68
5%	22.531	0,049%	103.927	-0,070%	2,713E-04	4.755	67
10%	22.640	0,531%	98.421	-5,365%	5,572E-04	4.596	64

Tabela 5.8 – Resultados para as estimativas dos parâmetros com a introdução dos ruídos nas medidas pseudoexperimentais - R2W

Ruído	C (Ns/m)		K (N/m)		Função Objetivo (F)	Tempo (s)	Nº Gerações
	Estimativa	Erro Relativo	Estimativa	Erro Relativo			
1%	22.533	0,056%	104.657	0,631%	5,620E-05	7.230	101
5%	22.557	0,163%	103.894	-0,102%	2,742E-04	5.067	71
10%	22.571	0,229%	107.571	3,433%	5,620E-04	4.168	61

A partir das TAB 5.7 e 5.8, nota-se que os erros relativos encontrados são inferiores aos níveis de ruído introduzidos. Logo, a metodologia adotada se mostra eficaz na estimativa dos parâmetros, revelando resultados satisfatórios tanto com o PSO quanto com o R2W.

Entretanto, os resultados reportados nas TAB 5.7 e 5.8 mostram que o erro relativo nos parâmetros estimados e o valor da função objetivo aumentam com o aumento do nível de ruído nas medidas pseudoexperimentais.

Por outro lado, e inesperadamente, o número de gerações requeridas para atingir a solução do problema inverso diminui com o aumento do nível de ruído. Este comportamento se manifesta, porque em todos os casos estudados a convergência ocorreu pela discrepância relativa da função objetivo após 60 gerações consecutivas ser menor que 1% e não pelo valor da função objetivo ser menor que  $10^{-6}$ . Portanto, constata-se que os métodos de otimização convergem rapidamente para um valor ótimo e com o aumento do nível de ruído, mais difícil é o refinamento da solução.

Nas FIG.5.7e 5.8 é possível acompanhar o histórico de convergência nas estimativas dos parâmetros para o PSO e para o R2W, respectivamente, quando as medidas pseudoexperimentais recebem ruídos de 1%, 5% e 10%.

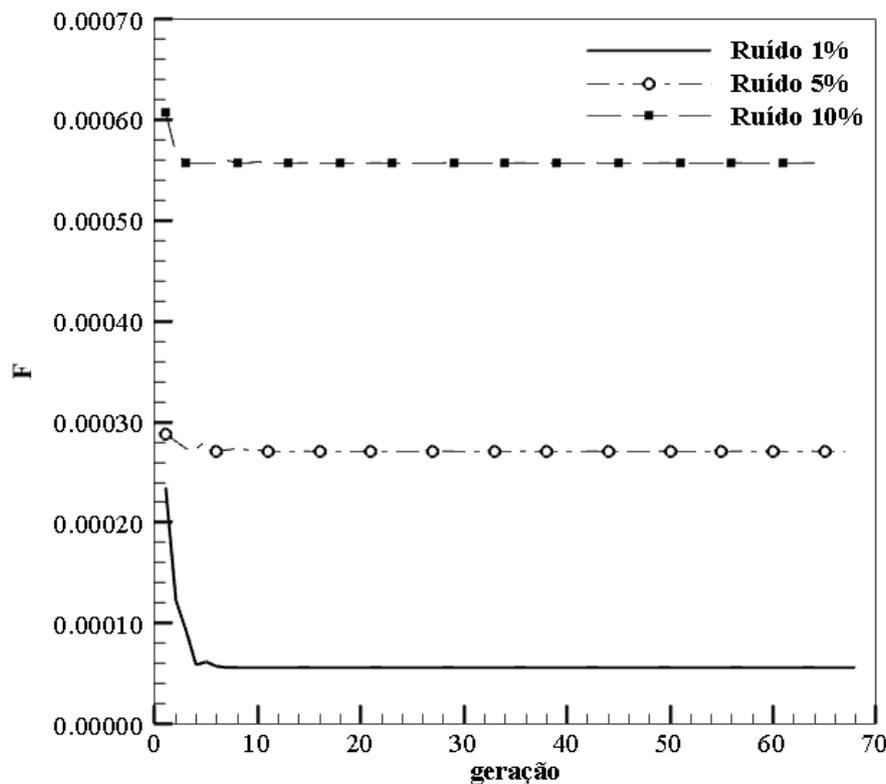


Figura 5.7 – Histórico de convergência com níveis de ruído iguais a 1%, 5% e 10% - PSO

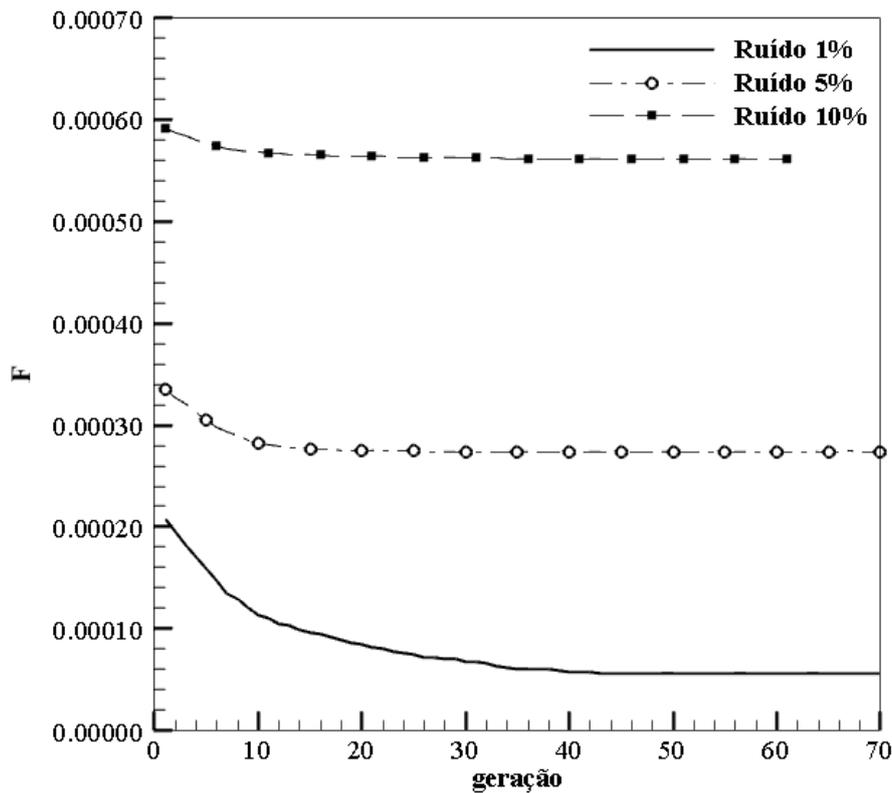


Figura 5.8 – Histórico de convergência com níveis de ruído iguais a 1%, 5% e 10% - R2W

Em ambas as rotinas implementadas, a maior minimização ocorreu com a introdução de 1% de ruído nas medidas pseudoexperimentais, possibilitando assim, melhores resultados para os parâmetros estimados. Além disso, o tempo computacional é consideravelmente maior para a rotina R2W.

Os resultados estimados considerando 5% de ruído, com o PSO e com o R2W são equivalentes, diferindo, porém, no tempo computacional, onde maiores valores são encontrados com o R2W. Por outro lado, ao se introduzir 10% de ruído, o PSO apresentou resultados piores que o R2W, pois as estimativas geradas pela rotina R2W geraram erros relativos e tempo computacional mais baixo.

#### 5.4 CONCLUSÃO

Os ajustes realizados nos parâmetros empíricos de cada método de otimização permitiram resultados estimados satisfatórios, mesmo após a introdução dos ruídos nas medidas pseudoexperimentais. Ou seja, com erro relativo inferiores ao nível de ruído avaliado.

Os tempos computacionais, em ambas as rotinas, apresentam resultados muito próximos, exceto, com 1% de ruído, condição na qual o R2W dispendeu maior tempo computacional.

Nota-se também que não houve convergência por tolerância  $10^{-6}$  em nenhum caso com ruído.

As FIG. 5.7 e 5.8 evidenciam que o critério de convergência atendido corresponde a discrepância relativa inferior a 1%, entre duas avaliações sucessivas da função objetivo, durante 60 gerações subsequentes. Porém, as estimativas geradas obtiveram erro relativo inferior a 1%, exceto para a rigidez da suspensão, considerando 10% de ruído, em ambas as rotinas.

## 6 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS: IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS NOS AMORTECEDORES

O objetivo desse capítulo é verificar a viabilidade da abordagem de problema inverso proposta na identificação e quantificação de uma falha em um dos amortecedores de um veículo militar sobre lagartas, o qual foi apresentado no CAPÍTULO 3. Ademais, nesta abordagem, o problema direto é constituído pelo modelo de ½ carro, cuja solução numérica foi verificada no CAPÍTULO 4. Portanto, o problema inverso consiste na estimativa simultânea dos coeficientes de amortecimento dos 5 amortecedores ( $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ ) utilizados no modelo de ½ carro.

As características do veículo foram apresentadas nas TAB. 4.3 e 4.4 e considera-se que o veículo trafega a 10km/h. A excitação de base imposta pelo terreno é descrita nas EQ. 3.9 e 3.10, coma lombada possuindo largura igual 0,5m e altura de 0,1m.

As falhas são simuladas, aplicando em um dos amortecedores 10%, 50% e 90% de degradação sobre o valor de projeto do coeficiente de amortecimento, o qual é igual a 22.520Ns/m (ATA, 2014).

O problema inverso de estimativa de parâmetros utiliza medidas simuladas, doravante denominadas pseudoexperimentais, da aceleração vertical do CG ( $\ddot{Z}_{exp}$ ) ( $m/s^2$ ) e da aceleração angular ( $\ddot{\theta}_{exp}$ ) ( $rad/s^2$ ) do chassi. Estas medidas simuladas são obtidas a partir da solução do problema direto que utiliza os valores exatos dos parâmetros da suspensão.

As medidas pseudoexperimentais ( $\ddot{Z}_{exp}$  e  $\ddot{\theta}_{exp}$ ) são comparadas com as medidas obtidas a partir da solução do problema direto ( $\ddot{Z}$  e  $\ddot{\theta}$ ), a qual é gerada com os parâmetros dos amortecedores pertinentes a cada indivíduo que compõe a população nos métodos de otimização evolucionários estudados: PSO e R2W. Assim, para cada indivíduo está associado um conjunto de 5 coeficientes de amortecimento e uma solução do problema direto.

Portanto, os métodos de otimização identificam o indivíduo que gerou a melhor solução e, conseqüentemente, a melhor estimativa de parâmetros, dando origem a uma população aprimorada na vizinhança do melhor indivíduo. Desta forma, a população evolui buscando a solução para o problema inverso.

O sistema de equações diferenciais de segunda ordem que compõem o problema direto é integrado numericamente pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem, cujo passo de integração

é igual a 0,001s. A solução numérica do problema em tela foi executada em um computador com configuração: Intel® Core i5 2,3 GHz, 4GB de memória RAM e 64 Bits.

Para a realização das estimativas dos parâmetros, primeiramente é recomendável a realização da análise de sensibilidade dos mesmos, a fim de saber quantos parâmetros podem ser estimados simultaneamente e em qual domínio do tempo isso é possível.

Além disso, cada um dos métodos de otimização possui constantes empíricas que devem ser ajustadas para cada tipo de problema. Assim, as constantes empíricas são determinadas por meio da avaliação do valor ótimo da função objetivo, pelo tempo computacional e pela discrepância entre os parâmetros estimados e os parâmetros corretos (os quais são conhecidos *a priori*).

Os detalhes da análise de sensibilidade, do problema inverso e dos ajustes dos parâmetros empíricos dos métodos de otimização PSO e R2W são tratados neste capítulo conforme descrito no CAPÍTULO 5.

## 6.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

As razões e a forma de realizar a análise de sensibilidade expostas no CAPÍTULO 5 são consideradas neste capítulo.

Nas figuras apresentadas nesta seção, cada curva está associada a um conjunto diferente de coeficientes de amortecimento, onde apenas um dos amortecedores está degradado enquanto os demais estão na condição de projeto (22.520Ns/m).

As exceções são as FIG. 6.1 e 6.5, as quais representam a situação em que todos os amortecedores estão funcionando na condição de projeto. Ou seja, possuem o coeficiente de amortecimento igual a 22.520Ns/m. As FIG. 6.1 e 6.5 são importantes, pois permitirão a avaliação dos efeitos da degradação dos amortecedores sobre os coeficientes de sensibilidade modificados.

As FIG. 6.1 a 6.4 exibem os coeficientes de sensibilidade modificados para a aceleração vertical do CG do chassi, respectivamente, para os coeficientes de amortecimento iguais a 22.520Ns/m (sem degradação), 20.268Ns/m (10% de degradação), 11.260Ns/m (50% de degradação) e 2.252Ns/m (90% de degradação).

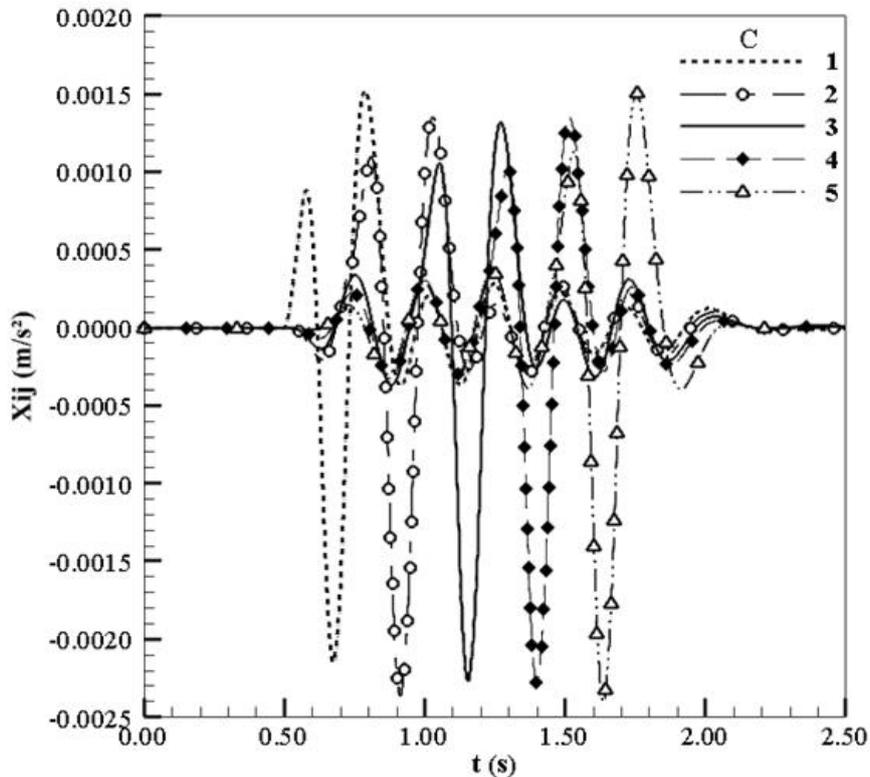


Figura 6.1 –  $X_{ij}$  - Aceleração vertical do CG do chassi (sem degradação)

Observa-se que os amortecedores influenciam o chassi de maneira muito similar, porém seus efeitos estão defasados no tempo, face à excitação de base imposta pelo terreno. Contudo, em algumas regiões do domínio, observa-se a dependência linear entre alguns amortecedores. Esta afirmação pode ser exemplificada comparando as curvas associadas aos amortecedores 1 e 2 a partir de 1,4s na FIG. 6.1. Este comportamento indica que nestas regiões a estimativa simultânea destes parâmetros poderá ser inviável. Portanto, a escolha do domínio útil para a estimativa de parâmetros se mostra fundamental para o sucesso da solução do problema inverso proposto.

As FIG. 6.1 e 6.2 mostram que os efeitos da introdução de 10% de degradação nos amortecedores não produziram diferenças significativas no comportamento das curvas dos coeficientes de sensibilidade modificados. Por outro lado, as FIG. 6.3 e 6.4 revelam que as degradações de 50% e de 90% sobre os amortecedores influenciam sobremaneira o comportamento das curvas dos coeficientes de sensibilidade modificados, intensificando a oscilação do chassi.

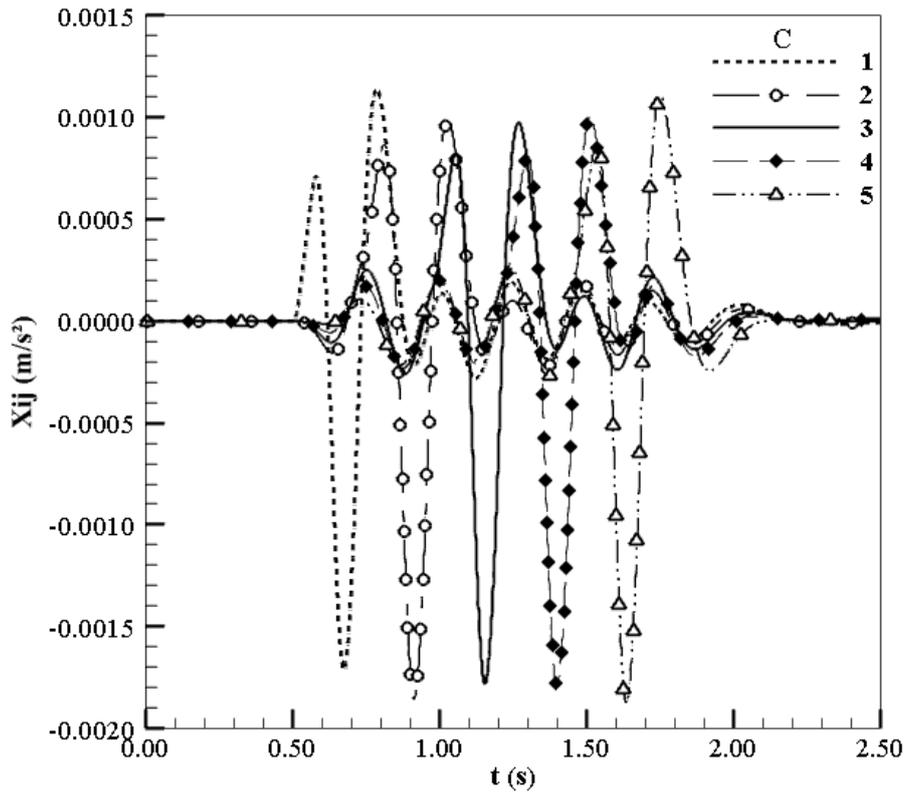


Figura 6.2 –  $X_{ij}$  - Aceleração vertical do CG do chassi (10% de degradação)

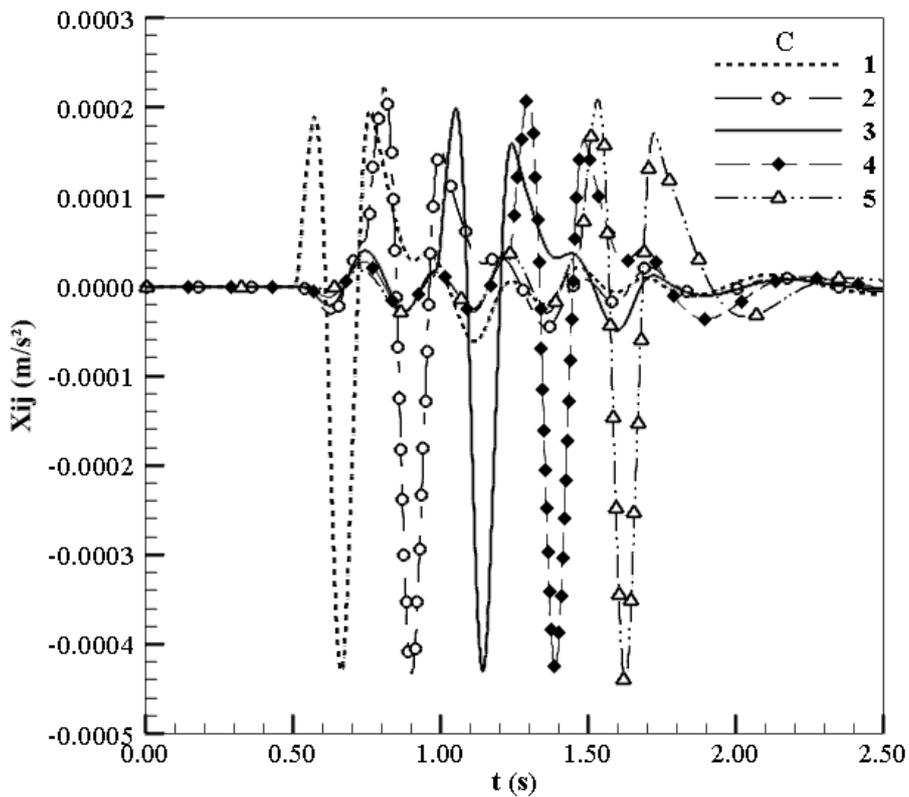


Figura 6.3 –  $X_{ij}$  - Aceleração vertical do CG do chassi (50% de degradação)

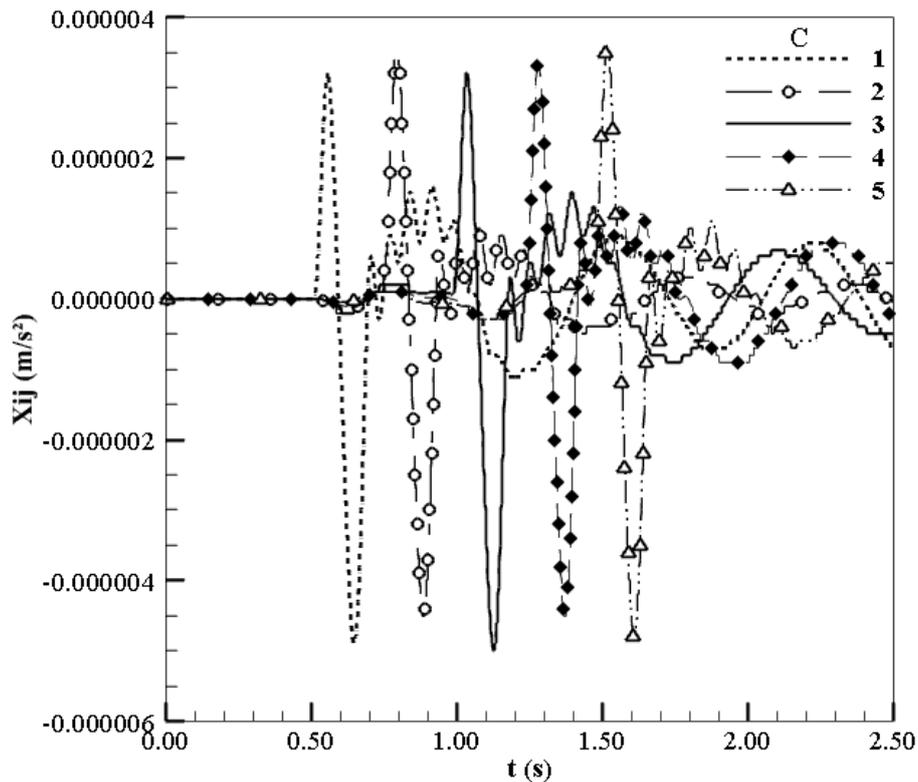


Figura 6.4 – Xij - Aceleração vertical do CG do chassi (90% de degradação)

As FIG. 6.5 a 6.8 exibem os coeficientes de sensibilidade modificados para a aceleração angular do chassi, respectivamente, para os coeficientes de amortecimento iguais a 22.520Ns/m (sem degradação), 20.268Ns/m (10% de degradação), 11.260Ns/m (50% de degradação) e 2.252Ns/m (90% de degradação). Nestas figuras, as curvas da aceleração angular do chassi possuem comportamentos e magnitudes diferentes, indicando a inexistência de dependência linear entre os cinco amortecedores.

É possível visualizar que as maiores magnitudes correspondem ao primeiro e ao quinto amortecedor, seguido do segundo e do quarto. Isso se deve a equidistância aproximada dos pontos de fixação de cada amortecedor no chassi em relação ao CG.

O terceiro amortecedor está fixado próximo ao CG e por isso não afeta significativamente o movimento de arfagem do chassi. Consequentemente, não influencia o sistema em magnitude considerável. Assim, a estimativa do coeficiente de amortecimento do terceiro amortecedor é inviável, se apenas as medidas de aceleração angular do chassi forem empregadas.

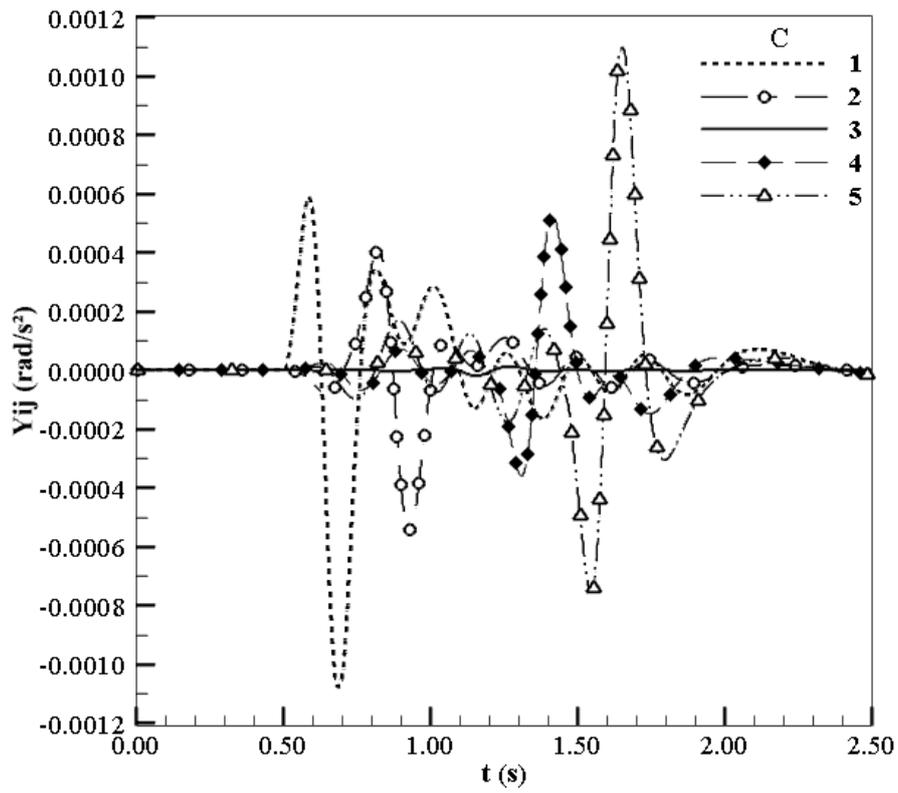


Figura 6.5 –  $Y_{ij}$  - Aceleração angular do chassi (sem degradação)

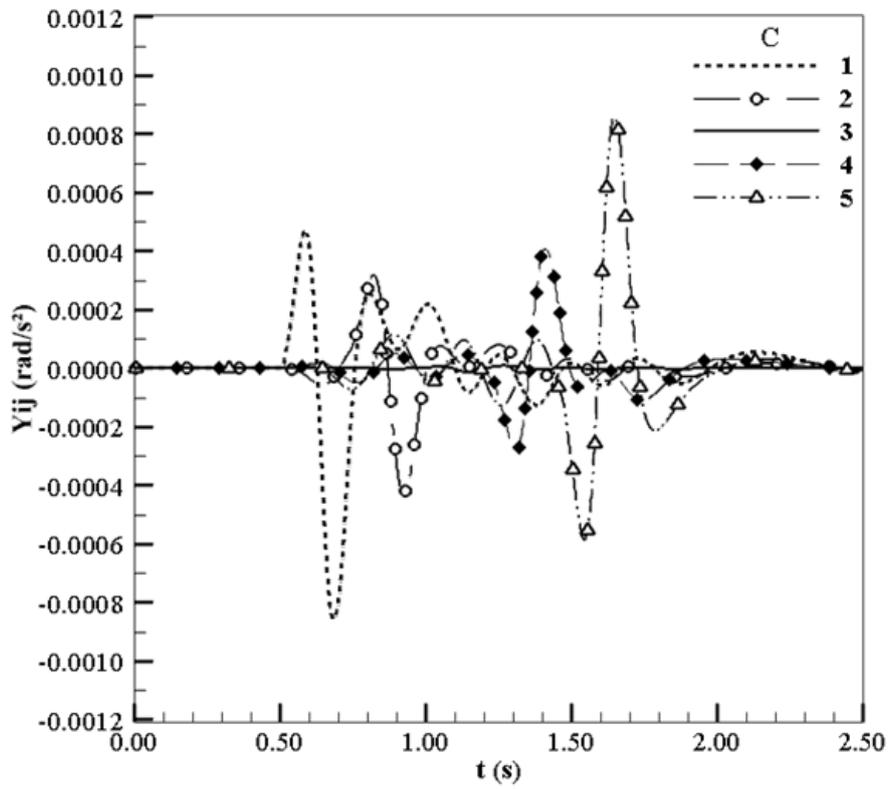


Figura 6.6 –  $Y_{ij}$  - Aceleração angular do chassi (10% de degradação)

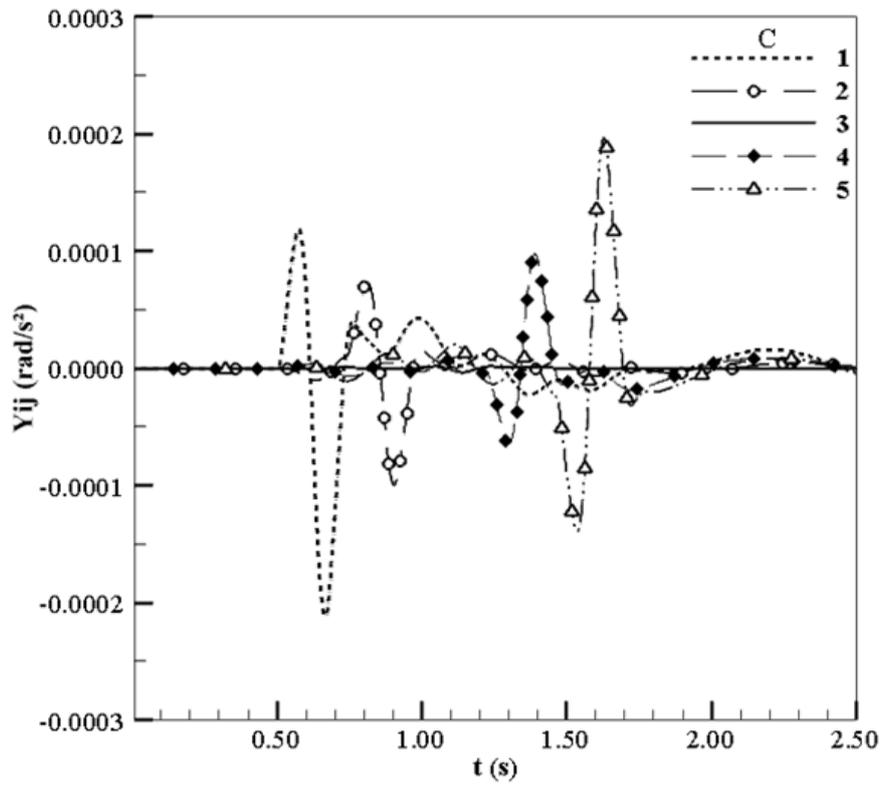


Figura 6.7 –  $Y_{ij}$  - Aceleração angular do chassi (50% de degradação)

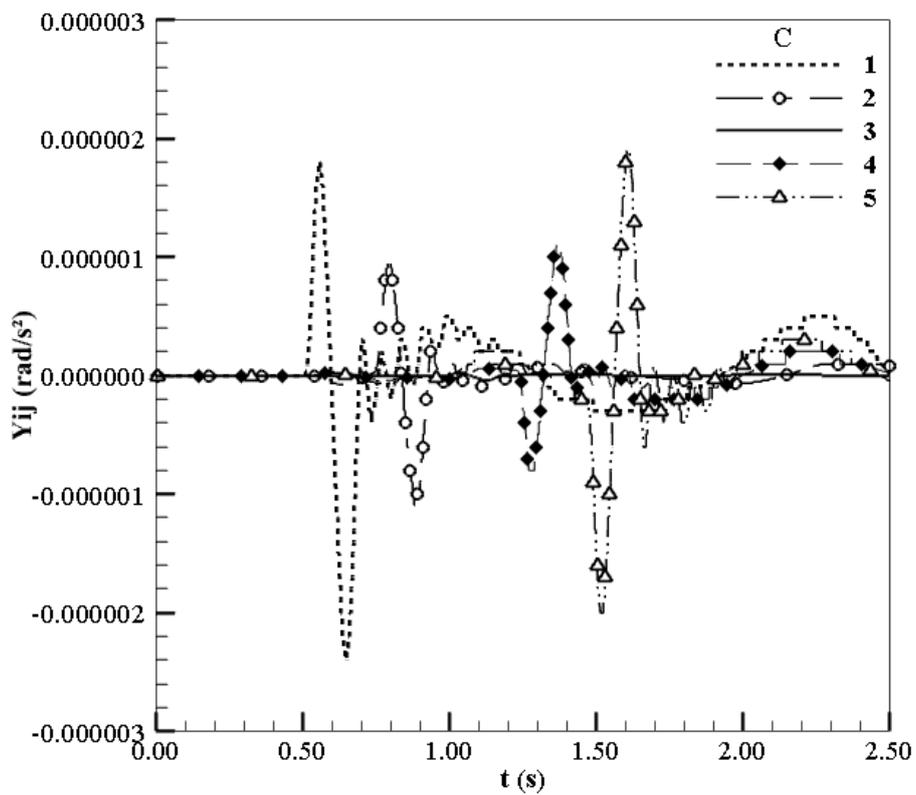


Figura 6.8 –  $Y_{ij}$  - Aceleração angular do chassi (90% de degradação)

A combinação das medidas da aceleração angular e da aceleração vertical do chassi na função objetivo favorece a estimativa de parâmetros, posto que as curvas do coeficiente de sensibilidade modificado da aceleração angular do chassi em relação ao coeficiente de amortecimento do terceiro amortecedor apresentam baixa magnitude, indicando a relevância de empregar dados de outras grandezas.

Ou seja, os coeficientes de sensibilidade modificados da aceleração vertical do CG do chassi apresentam maior magnitude quando comparado aos da aceleração angular do chassi, principalmente quando se trata do terceiro amortecedor. Além disso, a dependência linear observada com relação às curvas dos coeficientes de sensibilidade modificado da aceleração vertical do chassi em algumas regiões do domínio, também aponta a necessidade de utilização de outra grandeza a ser medida e introduzida na função objetivo.

Logo, o uso simultâneo das medidas da aceleração vertical do CG e da aceleração angular do chassi possibilitam melhores estimativas de parâmetros.

Nota-se também que o aumento do coeficiente de amortecimento é acompanhado de maiores magnitudes dos coeficientes de sensibilidade modificados, permitindo melhores estimativas de parâmetros.

A partir das FIG. 6.4 e 6.8 verifica-se que os menores coeficientes de sensibilidade modificados ocorrem quando o valor do coeficiente de amortecimento é igual a 2.252Ns/m. Desta forma, maiores dificuldades são esperadas na estimativa de parâmetros quando aplicado 90% de degradação no valor de projeto do coeficiente de amortecimento em um dos amortecedores.

Observa-se que os tempos menores que 0,5s representam os instantes que antecedem o encontro com a excitação de base e, portanto, o chassi permanece em equilíbrio mecânico dinâmico. Os tempos maiores a 2s representam os instantes em que cessam os efeitos relevantes da excitação de base sobre o chassi do veículo. Por isso, a faixa de tempo a ser considerada para a estimativa de parâmetros é definida como  $0,5s \leq t \leq 2s$ .

A análise de sensibilidade é realizada de maneira análoga para a faixa de valores delimitada pelo valor do coeficiente de amortecimento máximo e mínimo (TAB. 5.3). Assim, pode-se garantir a realização das estimativas dos parâmetros a qualquer valor de coeficiente de amortecimento dentro desse intervalo.

A análise detalhada para toda a faixa de valores dos parâmetros não é apresentada neste trabalho, porém chega-se a mesma conclusão quanto à realização das estimativas dos parâmetros apresentada para os coeficientes de amortecimento considerados.

## 6.2 VERIFICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO

Os detalhes da verificação dos métodos de otimização são apresentados no CAPÍTULO 5 e utilizados de forma análoga para a verificação ora efetuada. Portanto, a verificação dos métodos de otimização, não considera erros experimentais nas medidas pseudoexperimentais e emprega o critério de parada estabelecido na EQ. 5.7.

Face às características randômicas dos métodos de otimização evolucionários, são realizados três testes para cada combinação entre os parâmetros empíricos e as populações a serem analisadas. Essas populações são formadas por 10, 20 ou 40 indivíduos.

As rotinas implementadas PSO e R2W só convergiram com as populações formadas por 20 e 40 indivíduos e, quando suas constantes empíricas assumem, respectivamente,  $\beta=0,1$  e  $\alpha=0,5$ , e  $\delta=0,005$ . Ou seja, somente para esses tamanhos de população e parâmetros empíricos, as estimativas geradas por cada método de otimização resultou em valor para a função objetivo  $\leq 10^{-6}$ .

Por meio da TAB. 6.1 observa-se o melhor resultado dos três testes considerando população com 20 e 40 indivíduos para ambos os métodos de otimização.

Tabela 6.1 – Melhores resultados empregando R2W e PSO

População		R2W		PSO	
		20	40	20	40
C <sub>1</sub>	Estimativa	22.513	22.522	22.508	22.522
	Erro Relativo	-0,03%	0,01%	-0,05%	0,01%
C <sub>2</sub>	Estimativa	22.529	22.523	22.537	22.527
	Erro Relativo	0,04%	0,01%	0,07%	0,03%
C <sub>3</sub>	Estimativa	22.527	22.503	22.519	22.516
	Erro Relativo	0,03%	-0,07%	0,00%	-0,02%
C <sub>4</sub>	Estimativa	22.509	22.496	22.523	22.516
	Erro Relativo	-0,05%	-0,10%	0,02%	-0,02%
C <sub>5</sub>	Estimativa	22.535	22.532	22.517	22.537
	Erro Relativo	0,07%	0,05%	-0,01%	0,08%
Função Objetivo (F)		<b>7E-07</b>	9E-07	<b>6E-07</b>	7E-07
Tempo (s)		11.386	19.450	2.053	2.283
N° Gerações		177	160	33	18

Assim, escolhe-se a população formada por 20 indivíduos para ambos os métodos de otimização, pois possuem o menor valor para a função objetivo, viável tempo computacional e estimativas satisfatórias.

### 6.3 VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROBLEMA INVERSO

Conforme escrito anteriormente, neste capítulo, propõe-se a identificação e quantificação da falha simulada em um dos cinco amortecedores. São analisadas duas taxas de aquisição de dados: 1kHz e 40Hz.

Em ambas as taxas de aquisição de dados são avaliados os efeitos dos percentuais de ruídos introduzidos nas medidas pseudoexperimentais, segundo EQ. 5.8 e 5.9, e cuja finalidade é atenuar o crime inverso. E considera-se como critério de parada as EQ. 5.10 e 5.11.

Também se analisa o desempenho dos métodos de otimização ao aplicar os percentuais de degradação no valor de projeto dos coeficientes de amortecimento. Para isso, também são estimados os cinco amortecedores sem aplicação de percentual de degradação, ou seja, os coeficientes de amortecimento equivalem ao valor de projeto (22.520 Ns/m). Em seguida os valores da função objetivo das estimativas geradas com e sem a degradação aplicada são comparados.

#### 6.3.1 ANÁLISE DO RUÍDO E DA DEGRADAÇÃO DOS AMORTECEDORES – 1kHz

Nesta frequência de dados, somente é aplicado 50% de degradação no valor de projeto do coeficiente de amortecimento, em um dos cinco amortecedores por vez. São introduzidos 1% e 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais da aceleração vertical do CG ( $m/s^2$ ) e da aceleração angular do chassi ( $rad/s^2$ ).

A função objetivo recebe todas as medidas geradas para a aceleração vertical do CG e da aceleração angular do chassi, segundo  $\Delta t=0,001s$ . O que representa uma taxa de aquisição de dados com uma frequência de 1kHz. Essa taxa de aquisição de dados pode ser obtida com o emprego de acelerômetros piezoelétricos.

As TAB. 6.2 e 6.3 exibem os detalhes das estimativas de parâmetros geradas, respectivamente, pelo PSO e R2W, na frequência de 1kHz. Cada falha simulada estimada está

associada às estimativas dos demais amortecedores e seus erros relativos, ao valor da função objetivo, ao tempo computacional e ao número de gerações.

Por meio das TAB. 6.2 e 6.3 observa-se que o critério de convergência atendido corresponde à discrepância relativa inferior a 1% entre duas avaliações sucessivas da função objetivo, durante 60 gerações consecutivas, para todos os casos com 1% e 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais. Entretanto, todos os casos com 0% de ruído atenderam a tolerância igual a  $10^{-6}$  como critério de convergência.

As estimativas geradas por ambos os métodos de otimização apresentam erros relativos inferiores aos ruídos inseridos. Exceto quando 50% de degradação são aplicadas no valor de projeto do coeficiente de amortecimento do primeiro amortecedor e com a introdução de 1% de ruído nas medidas pseudoexperimentais (TAB. 6.2), e do segundo e quarto amortecedores, com a introdução de 10% de ruído nas medidas pseudoexperimentais (TAB. 6.3).

Para ambos os métodos de otimização, o tempo computacional dispendido para todos os casos com 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais é menor quando comparado aos casos com 1% de ruído. Este comportamento se manifesta, pois o início da convergência por discrepância relativa da função objetivo se iniciou mais rapidamente à medida que o valor do nível de ruído aumenta.

Entretanto, o tempo computacional dos casos sem ruídos nas medidas pseudoexperimentais apresentam resultados diferentes para cada método de otimização. O PSO possui o menor tempo computacional associado aos casos com 0% de ruído. Exceto quando 50% de degradação são aplicadas no valor de projeto do terceiro amortecedor.

Por meio da FIG. 6.9 observa-se o histórico de convergência do terceiro amortecedor com os três níveis de ruídos analisados.

Nota-se que o método de otimização PSO necessita de maior número de gerações para atender ao critério de convergência quando não há a inserção de ruídos. Esse resultado concretiza a hipótese apontada na análise de sensibilidade, ou seja, de dificuldade na estimativa de parâmetros quando a falha está localizada no terceiro amortecedor.

Tabela 6.2 – Estimativas dos 5 coeficientes de amortecimento (PSO, 1kHz)

Degradação		Ruído	C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>3</sub>		C <sub>4</sub>		C <sub>5</sub>		Função Objetivo (F)	Tempo (s)	N° Gerações
Valor	Local		Valor	Erro											
0%	-	0%	22.508	-0,05%	22.537	0,07%	22.519	0,00%	22.523	0,02%	22.517	-0,01%	6,00E-07	2.053	33
	-	1%	22.549	0,13%	22.543	0,10%	22.465	-0,25%	22.550	0,13%	22.531	0,05%	5,62E-05	7.969	125
	-	10%	23.655	5,04%	22.582	0,28%	22.509	-0,05%	22.306	-0,95%	23.059	2,40%	5,59E-04	3.962	65
50%	C <sub>1</sub>	0%	<b>11.265</b>	<b>0,04%</b>	22.520	0,00%	22.501	-0,08%	22.510	-0,05%	22.522	0,01%	7,00E-07	1.445	23
		1%	<b>11.491</b>	<b>2,05%</b>	22.691	0,76%	21.824	-3,09%	22.898	1,68%	22.620	0,44%	5,72E-05	4.978	80
		10%	<b>11.185</b>	<b>-0,66%</b>	21.980	-2,40%	22.992	2,10%	22.565	0,20%	22.222	-1,32%	5,42E-04	3.972	65
	C <sub>2</sub>	0%	22.508	-0,05%	<b>11.259</b>	<b>-0,01%</b>	22.541	0,09%	22.515	-0,02%	22.522	0,01%	6,00E-07	1.207	19
		1%	22.522	0,01%	<b>11.265</b>	<b>0,05%</b>	22.505	-0,07%	22.588	0,30%	22.479	-0,18%	5,39E-05	4.525	74
		10%	22.295	-1,00%	<b>11.156</b>	<b>-0,92%</b>	22.830	1,38%	23.188	2,96%	22.214	-1,36%	5,36E-04	4.084	65
	C <sub>3</sub>	0%	22.537	0,08%	22.501	-0,08%	<b>11.261</b>	<b>0,01%</b>	22.529	0,04%	22.514	-0,03%	8,00E-07	4.833	79
		1%	22.529	0,04%	22.531	0,05%	<b>11.247</b>	<b>-0,12%</b>	22.512	-0,03%	22.492	-0,12%	5,50E-05	4.413	72
		10%	22.973	2,01%	22.186	-1,48%	<b>10.986</b>	<b>-2,43%</b>	21.899	-2,76%	22.550	0,13%	5,55E-04	4.077	66
	C <sub>4</sub>	0%	22.516	-0,02%	22.540	0,09%	22.492	-0,12%	<b>11.267</b>	<b>0,06%</b>	22.520	0,00%	8,00E-07	1.461	23
		1%	22.549	0,13%	22.546	0,12%	22.464	-0,25%	<b>11.286</b>	<b>0,23%</b>	22.539	0,09%	5,59E-05	8.420	139
		10%	22.808	1,28%	22.133	-1,72%	22.612	0,41%	<b>10.906</b>	<b>-3,14%</b>	22.106	-1,84%	5,58E-04	3.963	65
	C <sub>5</sub>	0%	22.530	0,04%	22.506	-0,06%	22.529	0,04%	22.541	0,09%	<b>11.249</b>	<b>-0,09%</b>	1,00E-06	1.203	19
		1%	22.549	0,13%	22.554	0,15%	22.460	-0,27%	22.541	0,09%	<b>11.261</b>	<b>0,01%</b>	5,57E-05	8.188	131
		10%	22.858	1,50%	22.097	-1,88%	22.876	1,58%	21.886	-2,82%	<b>11.186</b>	<b>-0,65%</b>	5,51E-04	4.071	65

Tabela 6.3 – Estimativas dos 5 coeficientes de amortecimento (R2W, 1kHz)

Degradação		Ruído	C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>3</sub>		C <sub>4</sub>		C <sub>5</sub>		Função Objetivo (F)	Tempo (s)	N° Gerações
Valor	Local		Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro			
0%	-	0%	22.513	-0,03%	22.529	0,04%	22.527	0,03%	22.509	-0,05%	22.535	0,07%	7,00E-07	11.386	177
	-	1%	22.597	0,34%	22.463	-0,25%	22.495	-0,11%	22.540	0,09%	22.582	0,28%	5,55E-05	12.411	206
	-	10%	23.824	5,79%	21.891	-2,79%	18.074	-19,74%	16.281	-27,70%	24.515	8,86%	6,12E-04	3.678	61
50%	C <sub>1</sub>	0%	<b>11.267</b>	<b>0,06%</b>	22.523	0,01%	22.545	0,11%	22.526	0,03%	22.507	-0,06%	9,00E-07	12.862	204
		1%	<b>11.249</b>	<b>-0,10%</b>	22.628	0,48%	22.488	-0,14%	22.496	-0,10%	22.559	0,17%	5,39E-05	12.432	190
		10%	<b>7.921</b>	<b>-29,66%</b>	24.303	7,92%	21.007	-6,72%	24.755	9,93%	22.367	-0,68%	5,70E-04	3.643	61
	C <sub>2</sub>	0%	22.521	0,00%	<b>11.251</b>	<b>-0,08%</b>	22.522	0,01%	22.528	0,03%	22.506	-0,06%	7,00E-07	15.229	244
		1%	22.545	0,11%	<b>11.230</b>	<b>-0,27%</b>	22.587	0,30%	22.503	-0,07%	22.533	0,06%	5,47E-05	11.155	170
		10%	21.895	-2,78%	<b>14.167</b>	<b>25,82%</b>	22.921	1,78%	20.448	-9,20%	22.007	-2,28%	6,00E-04	3.789	61
	C <sub>3</sub>	0%	22.527	0,03%	22.541	0,09%	<b>11.264</b>	<b>0,04%</b>	22.521	0,01%	22.527	0,03%	9,00E-07	11.541	191
		1%	22.592	0,32%	22.450	-0,31%	<b>11.201</b>	<b>-0,53%</b>	22.614	0,42%	22.519	0,00%	5,57E-05	9.128	135
		10%	22.203	-1,41%	22.340	-0,80%	<b>11.008</b>	<b>-2,24%</b>	22.386	-0,59%	22.511	-0,04%	5,38E-04	3.713	61
	C <sub>4</sub>	0%	22.515	-0,02%	22.504	-0,07%	22.546	0,12%	<b>11.259</b>	<b>-0,01%</b>	22.506	-0,06%	9,00E-07	11.837	187
		1%	22.550	0,13%	22.573	0,24%	22.562	0,18%	<b>11.230</b>	<b>-0,27%</b>	22.505	-0,07%	5,55E-05	14.315	220
		10%	22.600	0,36%	20.508	-8,94%	23.361	3,73%	<b>14.265</b>	<b>26,69%</b>	21.306	-5,39%	5,75E-04	3.780	61
	C <sub>5</sub>	0%	22.517	-0,01%	22.536	0,07%	22.502	-0,08%	22.539	0,08%	<b>11.250</b>	<b>-0,09%</b>	9,00E-07	8.690	143
		1%	22.486	-0,15%	22.531	0,05%	22.492	-0,12%	22.565	0,20%	<b>11.269</b>	<b>0,08%</b>	5,58E-05	9.256	144
		10%	20.943	-7,00%	20.861	-7,37%	22.938	1,86%	22.275	-1,09%	<b>12.021</b>	<b>6,76%</b>	5,68E-04	3.727	61

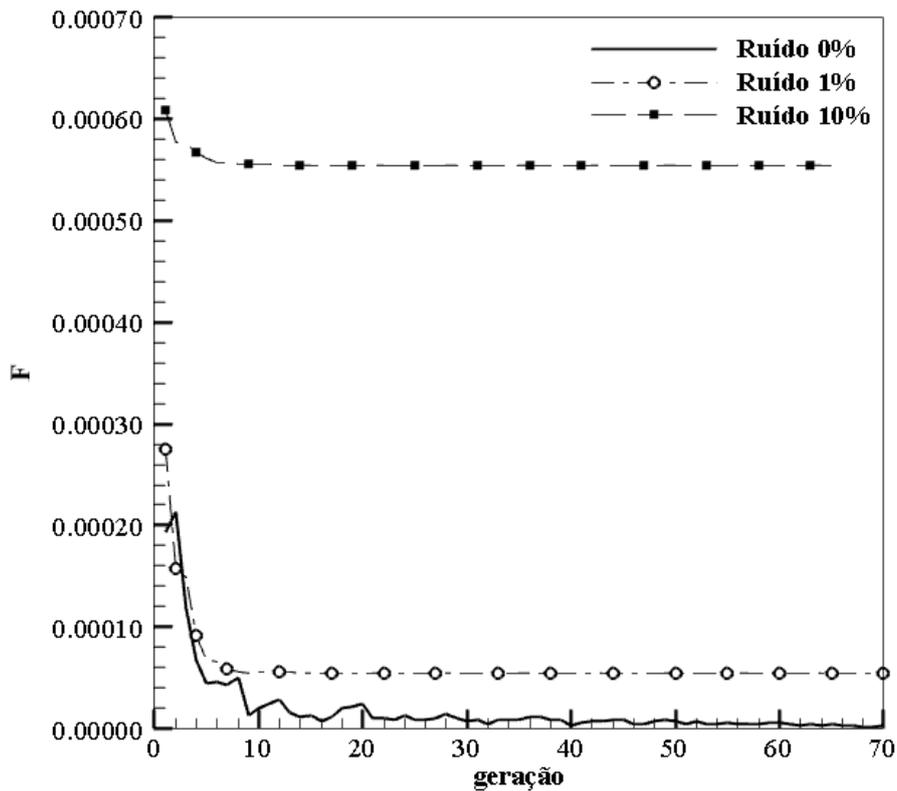


Figura 6.9 – Histórico de convergência –  $C_3$  com 50% de degradação - PSO

Em contrapartida, o método de otimização R2W possui o maior tempo computacional associado aos casos com 0% de ruído. Entretanto, existem três exceções. A primeira corresponde ao valor de projeto sem degradação aplicada e, as outras duas, quando 50% de degradação são aplicadas no valor de projeto do quarto e quinto amortecedores.

Por meio da FIG. 6.10 e 6.11 acompanha-se, respectivamente, o histórico de convergência do quarto e quinto amortecedores, quando são aplicadas 50% de degradação no valor de projeto de seus coeficientes de amortecimento. E a FIG. 6.12 exhibe o histórico de convergência do método R2W em que não é aplicado percentual de degradação no valor de projeto dos coeficientes de amortecimento.

Nota-se que o método R2W, devido as suas características randômicas, consegue gerar mais rapidamente uma estimativa para os cinco amortecedores que resulta em um valor para a função objetivo  $\leq 10^{-6}$ . Assim, necessita de menor número de gerações para atender o critério de convergência quando não há a inserção de ruídos.

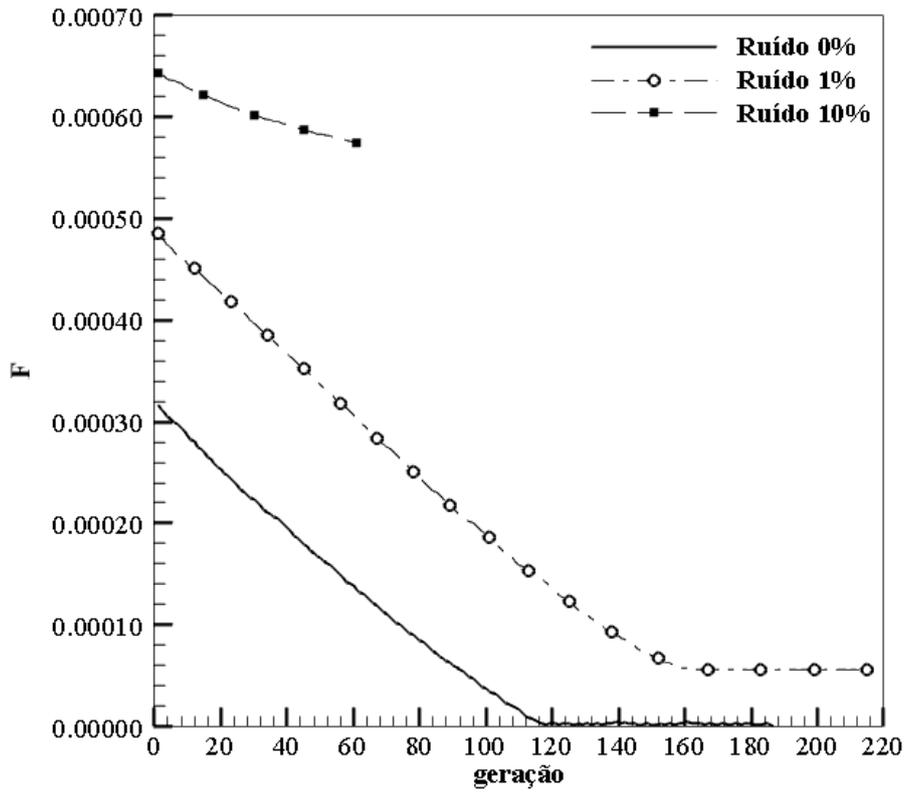


Figura 6.10 – Histórico de convergência –  $C_4$  com 50% de degradação - R2W

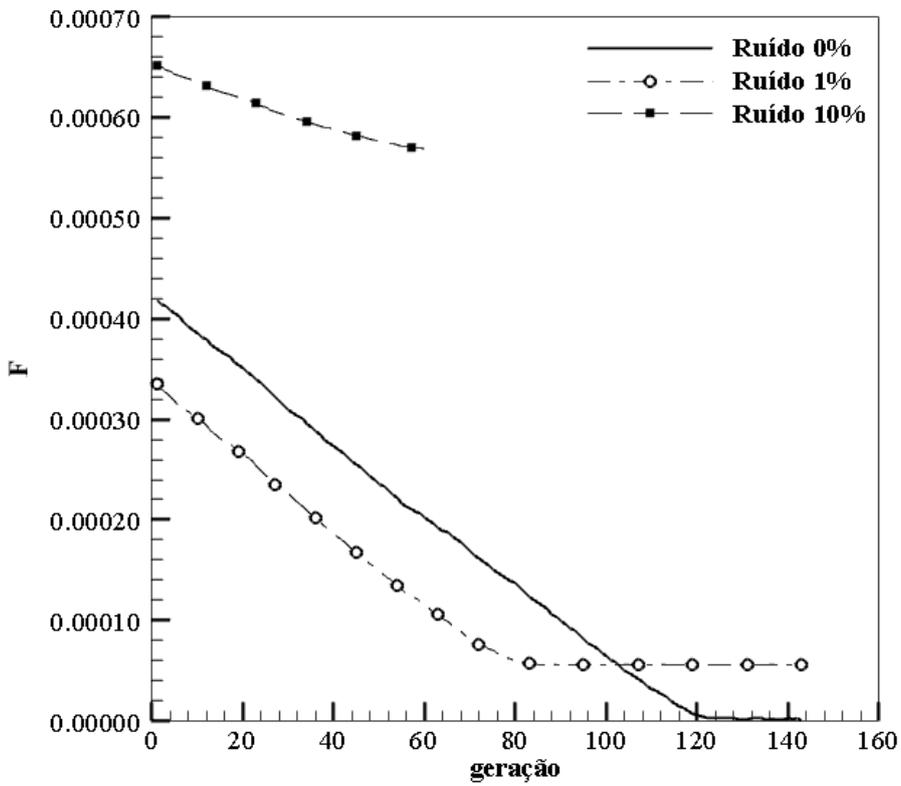


Figura 6.11 – Histórico de convergência –  $C_5$  com 50% de degradação - R2W

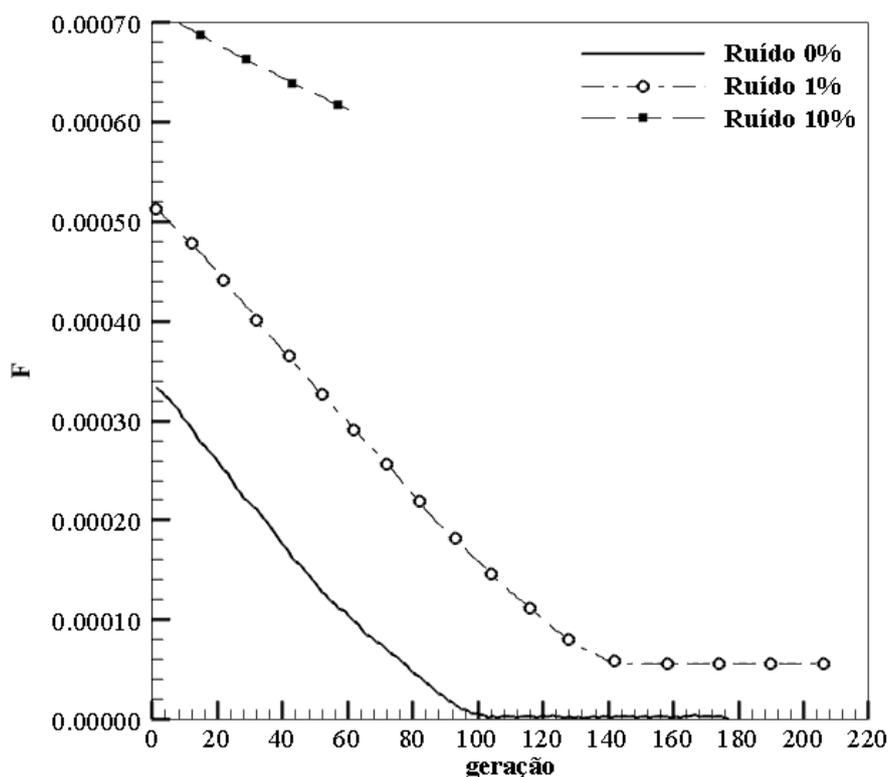


Figura 6.12 – Histórico de convergência – amortecedores sem degradação - R2W

Outro resultado relevante entre os métodos de otimização PSO e R2W é o tempo computacional. O R2W apresenta maiores tempos computacionais para todas as estimativas geradas sem a inserção de ruídos e com 1% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais.

O maior tempo computacional dispendido pelo R2W é consequência do ajuste realizado no parâmetro empírico  $\delta$  que define o tamanho da janela. Como visto no CAPÍTULO 2, quanto menor o valor de  $\delta$  menor é a janela onde a população estocástica é gerada e consequentemente, menor é a região de busca por melhores soluções (EQ. 2.1 a 2.3).

Além disso, o método só converge quando os indivíduos dessa população estão associados a um valor para a função objetivo muito próximo ou equivalente ao critério de convergência adotado (BIHAIN *et al.*, 2012).

Os tempos computacionais para as estimativas geradas pelo R2W e PSO, considerando 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais são semelhantes, apesar da convergência por discrepância relativa da função objetivo ocorrer com número superior de gerações para o PSO.

Posto isso, o melhor tempo computacional entre os métodos de otimização está associado ao PSO.

Vale ressaltar, que as gerações adicionais apresentadas pelo PSO, conduzem a uma maior minimização da função objetivo antes que sua convergência por discrepância relativa se inicie. E por isso, o PSO apresenta menor valor para a função objetivo para os casos com 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais.

Como exemplo, a FIG. 6.13 exibe o histórico de convergência do PSO e R2W em que são aplicados 50% de degradação no valor de projeto do coeficiente de amortecimento de  $C_2$  e são inseridos 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais. É possível observar a maior minimização da função objetivo obtida pelo PSO antes do início do processo de convergência por discrepância relativa da função objetivo.

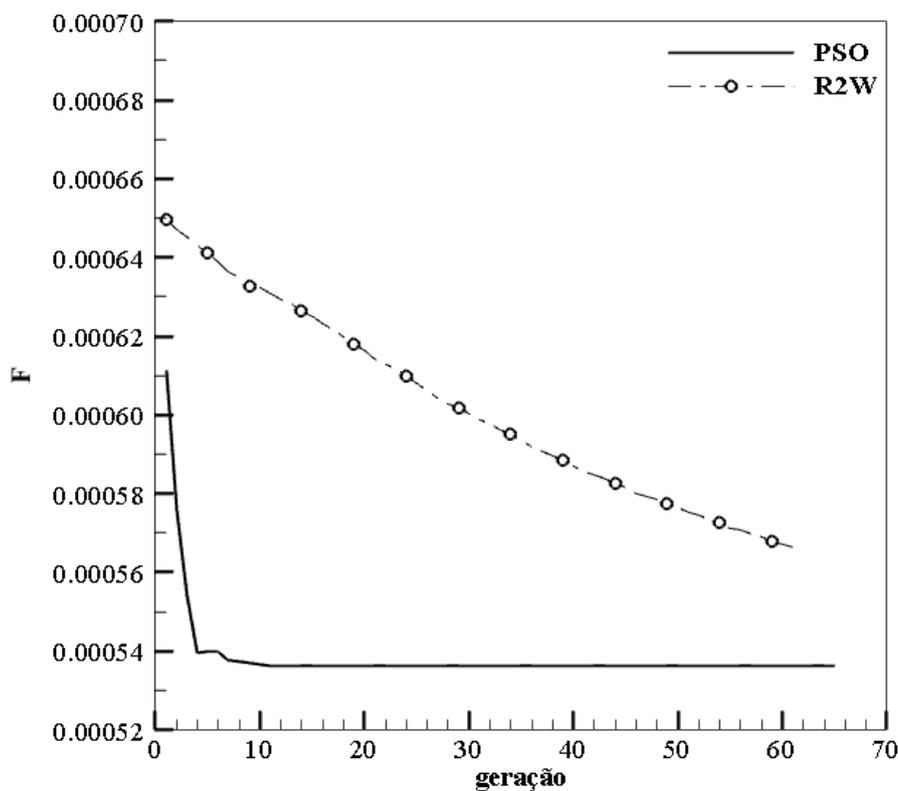


Figura 6.13 – Histórico de convergência –  $C_2$  com 50% de degradação e 10% de ruído

Entretanto, o PSO apresenta um caso cujo valor da função objetivo é superior quando comparado ao R2W. Ele representa a única exceção entre os casos com 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais e com 50% de degradação aplicada nos coeficientes de amortecimento. Trata-se da falha aplicada no terceiro amortecedor. A explicação para este comportamento está na característica randômica de ambos os métodos de otimização estudados.

Por meio da FIG. 6.14 é possível comparar o histórico de convergência do PSO e R2W, quando 50% de degradação são aplicados no coeficiente de amortecimento de  $C_3$  e são inseridos 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais. Nesta figura, verifica-se que o R2W minimizou mais a função objetivo.

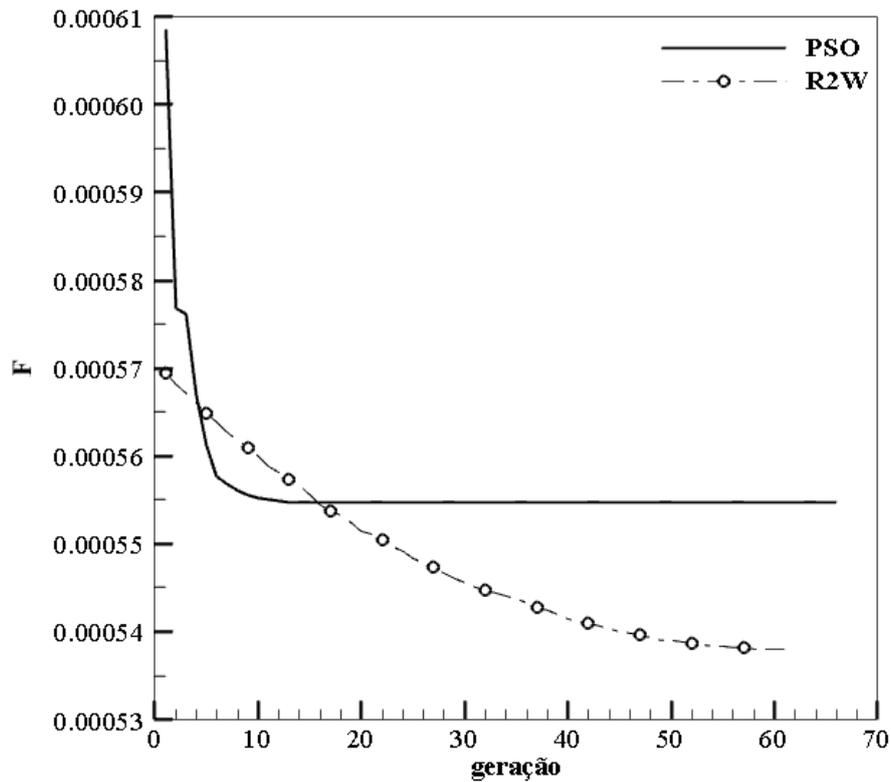


Figura 6.14 – Histórico de convergência –  $C_3$  com 50% de degradação e 10% de ruído

O próximo passo é analisar o efeito dos níveis de ruídos nas medidas pseudoexperimentais. Para realizar tal análise comparam-se os resultados da função objetivo entre cada nível de ruído analisado.

A partir das TAB. 6.2 e 6.3, observa-se que o aumento do nível de ruído implica em maiores valores da função objetivo e maiores erros relativos. Assim, pode-se concluir que quanto maior o nível de ruídos nas medidas pseudoexperimentais, maior é a dificuldade dos métodos em minimizar a função objetivo.

Analisando o valor da função objetivo também é possível indicar qual falha simulada é a melhor identificada. Assim, por meio da TAB. 6.2, conclui-se que a falha localizada no

segundo amortecedor é a melhor identificada pelo método PSO, pois possui o menor valor para a função objetivo em todos os níveis de ruído analisados.

Entretanto, as falhas melhor identificadas pelo método de otimização R2W (TAB. 6.3) não correspondem a um único amortecedor, tal como no PSO. Os resultados são diferentes para cada nível de ruído. Assim, a falha melhor identificada está: no segundo amortecedor, quando não há inserção de ruídos nas medidas pseudoexperimentais; no primeiro amortecedor quando são inseridos 1% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais; e no terceiro amortecedor, quando as medidas pseudoexperimentais recebem 10% de ruídos.

Porém, por meio das TAB. 6.2 e 6.3, observa-se que as falhas são identificadas com maiores erros relativos quando são estimadas pelo método de otimização R2W. Assim, o método de otimização PSO mostra melhor desempenho qualitativo ao identificar as falhas simuladas.

Outro objetivo desse capítulo é analisar o desempenho dos métodos de otimização ao aplicar 50% de degradação no valor de projeto do coeficiente de amortecimento. Para isso, são estimados os cinco amortecedores com coeficientes de amortecimento equivalente ao valor de projeto (22.520 Ns/m). E em seguida, os valores da função objetivo das estimativas geradas com e sem a degradação aplicada são comparados em todos os níveis de ruídos analisados.

Em ambos os métodos, os valores da função objetivo possuem a mesma ordem de grandeza. Exceto quando a falha aplicada no quinto amortecedor é estimada pelo método PSO com as medidas pseudoexperimentais sem ruídos, resultando no valor da função objetivo igual a  $10^{-6}$ .

Esse resultado é obtido face às características randômicas do método, pois a estimativa gerada para os cinco amortecedores resulta em um valor para a função objetivo equivalente ao valor do critério de convergência por tolerância, ou seja, o valor da função objetivo igual  $10^{-6}$ .

Assim, pode-se concluir que ambos os métodos de otimização possuem desempenho quantitativo equivalente quanto à identificação das falhas aplicadas.

Frente ao desempenho na identificação das falhas simuladas e ao menor tempo computacional dispendido pelo método de otimização PSO, na próxima etapa desse capítulo, em que se considera a frequência de 40Hz, somente o PSO será implementado.

### 6.3.2 ANÁLISE DA TAXA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E DA DEGRADAÇÃO DOS AMORTECEDORES – 40Hz

Na frequência de 40Hz são estimados os cinco amortecedores com 0%, 10%, 50% e 90% de degradação em seus valores de projeto do coeficiente de amortecimento. E as medidas pseudoexperimentais recebem somente 10% de ruído, visto que os maiores erros relativos ocorrem para esse nível de ruído analisado, portanto estes casos correspondem as piores condições estudadas para solucionar o problema inverso.

Tal como na etapa anterior, as medidas pseudoexperimentais da aceleração vertical do CG do chassi ( $m/s^2$ ) e da aceleração angular do chassi ( $rad/s^2$ ) são geradas com  $\Delta t=0,001s$ .

Entretanto, na etapa atual a função objetivo recebe as medidas geradas para a aceleração vertical do CG e para a aceleração angular do chassi a cada  $\Delta t=0,025s$ , representando uma taxa de aquisição de dados com uma frequência de 40Hz. Essa frequência pode ser conseguida com acelerômetros como MEMS, cujos valores de mercado são mais acessíveis.

Ao utilizar a frequência de 40Hz, também é possível analisar o efeito da taxa de aquisição de dados. Esse efeito pode ser avaliado ao comparar os valores da função objetivo obtida considerando os dados pseudoexperimentais com frequências de 40Hz e de 1kHz.

As estimativas de parâmetros geradas pelo PSO em frequência de 40Hz podem ser encontradas na TAB. 6.4. Cada falha simulada estimada está associada às estimativas dos demais amortecedores e seus erros relativos, ao valor da função objetivo, ao tempo computacional e ao número de gerações.

A partir da TAB. 6.4 verifica-se que o critério de convergência atendido em todos os níveis de degradação, corresponde à discrepância relativa inferior a 1% no valor da função objetivo avaliada entre duas gerações sucessivas, durante 60 gerações consecutivas.

As melhores estimativas dos cinco amortecedores ocorrem quando 10% e 50% de degradação são aplicados nos valores de projeto dos coeficientes de amortecimento. Pois, conforme possibilidade apontada na análise de sensibilidade, ao aplicar 90% de degradação nos valores dos coeficientes de amortecimento, menor é o coeficiente de sensibilidade modificado, e por isso, maior a dificuldade nas estimativas dos parâmetros.

Assim, observa-se maior erro relativo nas estimativas de parâmetros quando são aplicados 90% de degradação no valor de projeto dos coeficientes de amortecimento.

O próximo passo é analisar o impacto de cada percentual de degradação aplicada nos valores de projeto dos coeficientes de amortecimento, sobre o desempenho do método de otimização PSO. É possível observar na TAB. 6.4 que os valores da função objetivo das

estimativas geradas com e sem degradação aplicada possuem mesma ordem de grandeza, ou seja, o método de otimização obteve desempenho equivalente diante das aplicações de degradação sobre os valores dos coeficientes de amortecimento.

Outra análise refere-se ao efeito da taxa de aquisição de dados, ou seja, como o desempenho do método de otimização PSO é afetado pela frequência de 40Hz. Para isso, comparam-se os resultados da função objetivo em frequência de 1kHz (TAB. 6.2) com os valores da função objetivo obtidos em frequência de 40Hz (TAB. 6.4).

Os valores comparados da função objetivo são gerados a partir de medidas pseudoexperimentais com 10% de ruídos e com a aplicação de 50% de degradação nos valores de projeto dos coeficientes de amortecimento.

Observa-se que os resultados obtidos com a frequência de 40Hz são da ordem de grandeza igual a  $10^{-3}$ , enquanto que com a frequência de 1kHz os resultados da função objetivo são da ordem de grandeza igual a  $10^{-4}$ . Ou seja, em frequência de 40Hz os resultados da função objetivo são maiores quando comparados aos resultados da função objetivo em frequência de 1kHz.

Esse resultado indica que o menor número de medidas para a aceleração vertical do CG e aceleração angular do chassi, presentes na função objetivo, dificultou o refinamento da solução por parte do método de otimização PSO. Com menos pontos pseudoexperimentais, menos informação é fornecida ao método de solução do problema inverso, portanto maior erro é esperado.

Em outras palavras, conforme visto no CAPÍTULO 2 as novas gerações evoluem em torno do indivíduo com o menor valor para a função objetivo. Entretanto, devido ao menor número de medidas presentes na função objetivo, as sucessivas evoluções da população ocorrem em torno de indivíduos cujo valor da função objetivo possui ordem de grandeza superior a  $10^{-3}$ .

Como exemplo, a FIG. 6.15 exhibe o histórico de convergência do segundo amortecedor quando são aplicadas 50% de degradação no valor de projeto do seu coeficiente de amortecimento.

É possível observar que com a frequência de 1kHz, a evolução da população foi beneficiada pela presença do maior número de medidas, pois possuem menores valores para a função objetivo.

Tabela 6.4 – Estimativas dos 5 coeficientes de amortecimento (PSO, 40Hz)

Degradação		C <sub>1</sub>		C <sub>2</sub>		C <sub>3</sub>		C <sub>4</sub>		C <sub>5</sub>		Função Objetivo (F)	Tempo (s)	N° Gerações
Valor	Local	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro	Valor	Erro			
0%	-	22.225	-1,31%	20.830	-7,51%	22.110	-1,82%	22.759	1,06%	22.925	1,80%	8,18E-03	9.396	65
10%	C <sub>1</sub>	<b>20.877</b>	<b>3,00%</b>	22.960	1,95%	23.067	2,43%	23.240	3,20%	21.750	-3,42%	8,97E-03	11.893	66
	C <sub>2</sub>	23.171	2,89%	<b>21.025</b>	<b>3,73%</b>	24.304	7,92%	21.546	-4,32%	22.904	1,71%	9,44E-03	10.645	66
	C <sub>3</sub>	20.966	-6,90%	25.154	11,70%	<b>19.789</b>	<b>-2,36%</b>	21.685	-3,71%	24.357	8,16%	9,83E-03	13.224	64
	C <sub>4</sub>	23.257	3,27%	22.768	1,10%	23.219	3,10%	<b>20.884</b>	<b>3,04%</b>	21.726	-3,53%	9,27E-03	9.494	67
	C <sub>5</sub>	22.462	-0,26%	23.745	5,44%	21.033	-6,60%	21.139	-6,13%	<b>20.909</b>	<b>3,16%</b>	8,27E-03	10.726	64
50%	C <sub>1</sub>	<b>11.437</b>	<b>1,58%</b>	23.084	2,50%	23.549	4,57%	23.174	2,90%	21.665	-3,80%	8,90E-03	10.252	66
	C <sub>2</sub>	21.680	-3,73%	<b>10.239</b>	<b>-9,07%</b>	21.686	-3,70%	20.969	-6,89%	22.682	0,72%	9,29E-03	9.609	67
	C <sub>3</sub>	23.352	3,69%	23.345	3,66%	<b>10.250</b>	<b>-8,97%</b>	23.843	5,88%	21.839	-3,02%	9,19E-03	9.640	64
	C <sub>4</sub>	22.928	1,81%	21.637	-3,92%	20.826	-7,52%	<b>11.470</b>	<b>1,86%</b>	21.918	-2,67%	9,08E-03	10.022	67
	C <sub>5</sub>	23.298	3,45%	22.856	1,49%	23.407	3,94%	23.159	2,84%	<b>10.901</b>	<b>-3,19%</b>	9,23E-03	9.641	64
90%	C <sub>1</sub>	<b>2.015</b>	<b>-10,54%</b>	21.514	-4,47%	20.836	-7,48%	21.443	-4,78%	22.386	-0,60%	8,82E-03	10.806	65
	C <sub>2</sub>	21.536	-4,37%	<b>1.264</b>	<b>-43,87%</b>	21.582	-4,16%	20.837	-7,47%	22.589	0,31%	9,20E-03	10.664	64
	C <sub>3</sub>	23.170	2,89%	23.259	3,28%	<b>1.459</b>	<b>-35,21%</b>	24.031	6,71%	21.911	-2,71%	9,18E-03	10.142	66
	C <sub>4</sub>	23.259	3,28%	22.547	0,12%	23.927	6,25%	<b>2.905</b>	<b>29,01%</b>	22.869	1,55%	9,48E-03	9.456	65
	C <sub>5</sub>	22.984	2,06%	26.239	16,51%	22.283	-1,05%	23.732	5,38%	<b>2.819</b>	<b>25,19%</b>	8,87E-03	10.115	65

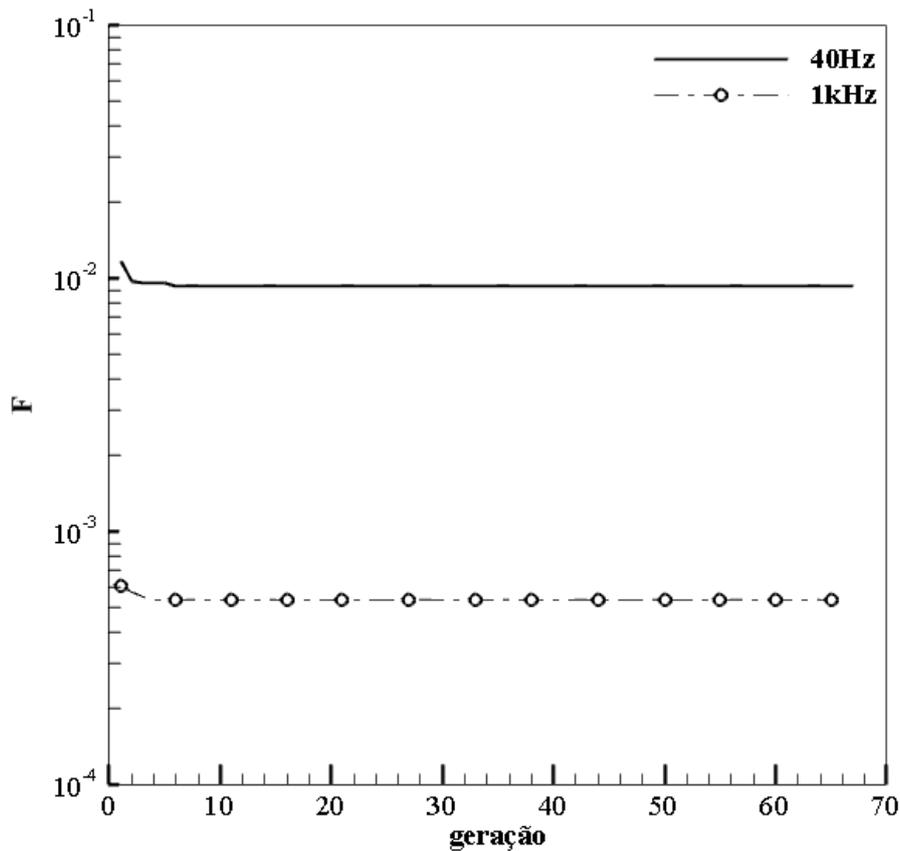


Figura 6.15 – Histórico de convergência –  $C_2$  com 50% de degradação e 10% de ruído- 40Hz e 1kHz

#### 6.4 CONCLUSÃO

Para o sucesso da solução do problema inverso, faz-se necessário o uso simultâneo das medidas pseudoexperimentais da aceleração vertical do CG e da aceleração angular do chassi, pois ambas as medidas possuem curvas com características e magnitudes que combinadas permitem a geração de melhores estimativas de parâmetros. Além disso, o intervalo de tempo ideal corresponde  $0,5s \leq t \leq 2s$ , pois somente neste período de tempo há efeitos relevantes da excitação de base sobre o chassi.

A seleção dos parâmetros empíricos dos métodos de otimização PSO e R2W foi conduzida, considerando os valores dos coeficientes de amortecimentos iguais aos valores de projeto (22.520Ns/m) na geração das medidas pseudoexperimentais, sem a introdução de ruído. Foi escolhido o valor  $\delta=0,005$  para o R2W e foram escolhidos os valores  $\alpha=0,5$  e  $\beta=1$  para o PSO. Além disso, dos testes com 10, 20 e 40 indivíduos presentes nas populações, os métodos de otimização só convergiram com 20 e 40 indivíduos. A população com 20

indivíduos, tanto para o PSO quanto para o R2W foi escolhida para a solução do problema inverso por esta proporcionar menor valor para a função objetivo, tempo computacional viável e baixos erros relativos dos parâmetros estimados.

Foi analisado o desempenho dos métodos de otimização R2W e PSO ao aplicar 0%, 10%, 50% e 90% de degradação nos valores de projeto dos coeficientes de amortecimento, e após inserir 1% e 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais. Também foi considerado duas taxas de aquisição de dados, 1kHz e 40Hz.

A avaliação de taxas de aquisição de dados experimentais (ou pseudoexperimentais) menores, as quais podem ser efetuadas por transdutores mais baratos, motivou a investigação da abordagem de problema inverso proposta com uma taxa de aquisição de dados de 40Hz.

Na frequência de 1kHz, aplicou-se 50% de degradação nos valores de projeto dos coeficientes de amortecimento, as medidas pseudoexperimentais receberam 0%, 1% e 10% de ruídos e a estimativa de parâmetros por meio dos métodos de otimização PSO e R2W.

O PSO dispendeu menor tempo computacional nos casos com 0% e 1% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais. Entretanto, ambos os métodos de otimização possuem tempo computacional semelhante quando as medidas pseudoexperimentais recebem 10% de ruídos.

Todos os casos com 1% e 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais atenderam o critério de convergência correspondente a discrepância relativa inferior a 1% entre duas avaliações sucessivas da função objetivo, durante 60 gerações consecutivas. Enquanto, todos os casos com 0% de ruído atenderam ao valor da função objetivo  $\leq 10^{-6}$  como critério de convergência.

Notou-se que para ambos os métodos de otimização e para todos os níveis de ruído, os valores da função objetivo possuem a mesma ordem de grandeza. Exceto quando a falha foi aplicada no quinto amortecedor e estimada pelo método PSO, no caso sem ruído.

Assim, ambos os métodos de otimização possuem desempenho equivalente quanto à identificação das falhas aplicadas nos amortecedores. Entretanto, o PSO apresentou menores erros relativos nos parâmetros estimados. Ademais, em ambos os métodos de otimização os erros relativos foram menores que os ruídos inseridos nas medidas pseudoexperimentais na maioria dos casos estudados.

Conclui-se, portanto, que o PSO obteve melhor desempenho ao identificar as falhas dos amortecedores.

Na frequência de 40Hz, aplicou-se 10%, 50% e 90% de degradação nos valores de projeto dos coeficientes de amortecimento, as medidas pseudoexperimentais receberam 10%

de ruído (por ser a condição mais severa avaliada com 1kHz) e somente o PSO foi utilizado para a estimativa de parâmetros (por este ter obtido melhor desempenho nas análises anteriores realizadas com 1kHz).

É possível observar, que os valores da função objetivo das estimativas geradas com e sem degradação aplicada possuem mesma ordem de grandeza, ou seja, o método de otimização PSO, obteve desempenho equivalente diante das aplicações de degradação sobre os valores dos coeficientes de amortecimento.

Entretanto, as melhores estimativas dos cinco amortecedores ocorreram com 10% e 50% de degradação nos valores de projeto dos coeficientes de amortecimento. Pois, devido ao baixo coeficiente de sensibilidade modificados relacionados aos casos com 90% de degradação no valor de projeto dos coeficientes de amortecimento, foram observados maiores erros relativos nas estimativas de parâmetros.

O critério de convergência atendido, em todos os níveis de degradação, corresponde à discrepância relativa inferior a 1% no valor da função objetivo avaliada entre duas gerações sucessivas, durante 60 gerações consecutivas.

Os valores ótimos da função objetivo obtidos com a frequência de 40Hz são da ordem de grandeza igual a  $10^{-3}$ , enquanto que com a frequência de 1kHz os resultados da função objetivo são da ordem de grandeza igual a  $10^{-4}$ . Portanto, como esperado, a menor taxa de aquisição de dados dificultou a minimização da função objetivo, resultando ainda em um maior tempo computacional.

Em ambos os métodos de otimização e em ambas as frequências, o aumento do nível de ruído foi acompanhado por maior erro relativo e maiores valores da função objetivo. Assim, pode-se concluir que quanto maior o nível de ruído nas medidas pseudoexperimentais, maior é a dificuldade dos métodos em minimizar a função objetivo.

## 7 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido nesta dissertação de mestrado consiste em estimar os parâmetros da suspensão passiva de um veículo militar. Para isso, utilizou-se um modelo de ½ carro, empregado para resolver o problema direto, e os métodos de otimização PSO e R2W na solução do problema inverso.

O modelo de ½ carro foi modificado de forma a permitir adaptações para diferentes configurações de veículos e terrenos. Assim, foi possível estudar um veículo sobre lagartas com cinco eixos, baseado no M113, que trafega em um terreno com uma lombada; e também um veículo sobre rodas com dois eixos, que trafega sobre um terreno com um degrau.

O modelo de ½ carro foi implementado em um código computacional escrito em *Scilab*<sup>®</sup>. O sistema de equações diferenciais de 2ª ordem, foi integrado numericamente pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem.

Os resultados obtidos a partir deste código computacional foram confrontados com referências e a congruência dos resultados indicou que a solução numérica proposta está correta.

Portanto, o código computacional do problema direto, constituído pelo modelo de ½ carro, permite avaliar a dinâmica do chassi e das rodas de veículos com diferentes configurações, trafegando por diferentes terrenos.

Os problemas inversos de estimativa de parâmetros da suspensão, estudados nesta dissertação, utilizaram o modelo de ½ carro aplicado a um veículo sobre lagartas, semelhante ao M113, constituído por 5 eixos, com suspensões passivas e independentes.

O PSO e o R2W foram verificados, estimando satisfatoriamente os parâmetros da suspensão, quando erros experimentais são negligenciados. Ou seja, nestes casos os erros nas estimativas realizadas foram inferiores a 0,08%. Estes resultados permitiram a seleção dos melhores parâmetros empíricos de cada método de otimização estudado, bem como do tamanho da população empregada.

Dois problemas inversos foram investigados. O primeiro considerou que todas as suspensões do veículo eram iguais, a fim de estimar simultaneamente o coeficiente de amortecimento e a rigidez da suspensão. O segundo problema visava estimar simultaneamente o coeficiente de amortecimento de cada uma das cinco suspensões do veículo, objetivando identificar e quantificar falhas nos amortecedores. Em ambos os problemas, foram avaliados

casos com 0%, 1%, 5% e 10% de ruído nas medidas pseudoexperimentais para atenuar o crime inverso.

A análise de sensibilidade indicou a necessidade do uso simultâneo das medidas pseudoexperimentais da aceleração do CG e da aceleração angular do chassi, pois ambas as medidas possuíam curvas com características e magnitudes que combinadas permitem a geração de melhores estimativas de parâmetros.

A partir da análise de sensibilidade, também foi possível observar que quanto maior o coeficiente de amortecimento maior é o coeficiente de sensibilidade modificado, e por isso melhor são as possibilidades de estimativas de parâmetros. Ademais, por meio da análise de sensibilidade, definiu-se  $0,5s \leq t \leq 2s$  como o intervalo de tempo para realização da estimativa de parâmetros, pois somente nesse período de tempo há efeitos relevantes da excitação de base sobre o chassi.

Os ajustes realizados nos parâmetros empíricos de cada método de otimização permitiram resultados estimados satisfatórios, mesmo após a introdução dos ruídos nas medidas pseudoexperimentais. Ou seja, com erros relativos inferiores ao nível de ruído avaliado.

Com relação ao primeiro problema inverso, as estimativas geradas obtiveram erro relativo inferior a 1%, exceto para a rigidez da suspensão, considerando 10% de ruído e para ambos os métodos de otimização. Além disso, nos casos com ruído a convergência não atendeu ao valor da função objetivo  $\leq 10^{-6}$  e os tempos computacionais, no PSO e no R2W, apresentaram resultados muito próximos. Exceto, com 1% de ruído, condição na qual o R2W dispendeu maior tempo computacional.

Conclui-se que, quanto ao primeiro problema investigado, ambos os métodos de otimização apresentaram desempenho equivalente e verificou-se a viabilidade da adoção dos métodos de otimização na estimativa dos parâmetros da suspensão.

No segundo problema inverso, a estimativa de parâmetros visava identificar e quantificar uma falha em um dos cinco amortecedores. Essa falha foi simulada aplicando 10%, 50% e 90% de degradação em um dos cinco amortecedores. Além disso, duas frequências de aquisição de dados experimentais (pseudoexperimentais) foram estudadas: 1kHz e 40Hz.

O desempenho dos métodos de otimização PSO e R2W foram analisados comparando o valor da função objetivo com e sem degradação aplicada nos valores de projeto dos coeficientes de amortecimento.

Primeiramente analisou-se o desempenho dos métodos em frequência de aquisição de dados de 1kHz e com 50% de degradação no valor de projeto do coeficiente de

amortecimento de um dos cinco amortecedores, e para atenuar o crime inverso foram inseridos 1% e 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais.

Nota-se que para ambos os métodos de otimização e para todos os níveis de ruídos, os valores da função objetivo gerados com 50% e sem degradação aplicada possuem a mesma ordem de grandeza. Exceto quando a falha aplicada no quinto amortecedor foi estimada pelo método PSO, sem ruídos.

Conclui-se que ambos os métodos de otimização possuem desempenho quantitativo equivalente quanto à identificação das falhas dos amortecedores. Entretanto, o PSO resultou em menores erros relativos nas estimativas realizadas. Ressalta-se que em ambos os métodos de otimização os erros relativos, na maioria dos casos avaliados, foram menores que os ruídos inseridos nas medidas pseudoexperimentais.

O método de otimização PSO mostrou melhor desempenho qualitativo ao identificar as falhas aplicadas, ao se observar o tempo computacional, o erro relativo nas estimativas realizadas e o valor da função objetivo.

Nota-se que para ambos os métodos de otimização o aumento do nível de ruído foi acompanhado por maior erro relativo e maior ordem de grandeza para os valores da função objetivo. Assim, pode-se concluir que quanto maior o nível de ruídos nas medidas pseudoexperimentais, maior é a dificuldade dos métodos em refinar as soluções.

Observa-se que todos os casos avaliados, tanto com o PSO quanto com o R2W, com 1% e 10% de ruídos nas medidas pseudoexperimentais atenderam, como critério de convergência, discrepância relativa inferior a 1% entre duas avaliações sucessivas da função objetivo, durante 60 gerações consecutivas. Enquanto, todos os casos com 0% de ruído convergiram ao atingir valores para a função objetivo  $\leq 10^{-6}$ .

A taxa de aquisição de dados de 40Hz foi investigada utilizando o PSO e para atenuar o crime inverso, foi inserido 10% de ruído nas medidas pseudoexperimentais. Foram estimados os coeficientes de amortecimento dos cinco amortecedores, considerando falhas com 10%, 50% e 90% de degradação.

Com 40Hz o PSO obteve estimativas de parâmetros semelhantes, independentes do nível de degradação. Entretanto, as melhores estimativas dos cinco amortecedores ocorrem quando 10% e 50% de degradação são aplicados. Pois, devido ao baixo coeficiente de sensibilidade modificado, quando se aplica 90% de degradação no valor de projeto dos coeficientes de amortecimento, foram observados maiores erros relativos nas estimativas de parâmetros.

Os resultados para o valor ótimo da função objetivo obtidos com a frequência de 40Hz foram da ordem de grandeza igual a  $10^{-3}$ , enquanto que com a frequência de 1kHz foram da ordem de  $10^{-4}$ . Ou seja, em frequência de 40Hz os resultados da função objetivo são superiores quando comparados aos resultados da função objetivo em frequência de 1kHz.

Logo, o menor número de medidas para a aceleração vertical do CG e aceleração angular do chassi presentes na função objetivo, dificultou a minimização da função objetivo. Além disso, o tempo computacional dispendido pelo PSO com a frequência de 40Hz foi maior quando comparado com a frequência de 1kHz.

Para dar continuidade a esse trabalho, sugere-se:

- a realização de experimentos para medir a aceleração vertical do CG e angular do chassi,
- a implementação de outros métodos de otimização,
- a otimização dos parâmetros da suspensão com o objetivo de melhorar o conforto dos passageiros ou a dirigibilidade do veículo,
- a investigação do comportamento do veículo ao trafegar por outros terrenos,
- o efeito combinado do deslocamento do veículo com o carregamento dinâmico produzido pelo armamento do veículo, e
- a utilização de um modelo de carro completo.

## 8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABBAS, W., EMAM, A., BADRAN S., SHEBL M., ABOUELATTA O. **Optimal seat and suspension design for a half-car with driver model using Genetic Algorithm.** Intelligent Control and Automation. 2013, v.4, p. 199-205.
- AGHARKAKLI, A., SABET, G.S., BAROUZ, A. **Simulation and analysis of passive and active suspension system using quarter car model for different road profile.** International Journal of Engineering Trends and Tecnology. 2012. v.3, n5, p. 636-644. ISSN: 2231-5381.
- ATA, W. G. K. **Intelligent control of tracked vehicle suspension.** 2014. Tese (PhD) – Faculdade de Engenharia e Ciências Físicas, Universidade de Manchester, 2014.
- ATA, W. G. K., OYADIJI S.O. **An investigation into the effect of suspension configurations on the performance of tracked vehicles traversing bump terrains.** Vehicle System Dynamics, 2014.v. 52, n. 7, p.969-999.
- BALLA, J. **Dynamics of mounted automatic cannon on track vehicle.** Defence Science Journal, 2011.vol. 5, n.1. p. 423-432.
- BIHAIN, A.L.J., CAMARA, L.D.T., NETO, A.J.S. **Avaliação da rotina inversa R2W na estimação de parâmetros de transferência de massa no processo de adsorção de glicose e frutose.** Tendências em Matemática Aplicada e Computacional, Set/Dez. 2012.v.13 p. 277-289.
- BREVE, F. A. **Otimização por enxame de partículas (PSO) e otimização por colônias de formigas (ASO) aplicadas ao problema do caixeiro viajante (TSP).** 2007. Monografia - Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, 2007.
- BRUYNE, S., AUWERAER, H.V., DIGLIO, P., ANTHONIS, J. **Online estimation of vehicle inertial parameters for improving chassis control systems.** In: 18<sup>th</sup> International Federation of Automatic Control World Congress , Milão, Itália. p. 1814-1819. 2011.
- CAVALHEIRO, J.V.S., AVILA, S.M. **Estudo paramétrico de sistemas de suspensão veicular passiva.** In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba, Brasil, ABCM. v. 1, p 1-10. 2010.
- CHÁVEZ, C.E., ALONZO-ATIENZA, F., ÁLVAREZ D., **Avoiding the inverse crime in the inverse problem of electrocardiography: estimating the shape and location of cardiac ischemia.** Computing in Cardiology, 2013.v. 40, n. 40,p. 687-690.

- COLAÇO, J.M., ORLANDE, H.R.B., DULIKRAVICH,G.S. **Inverse and optimization problems in heat transfer.** Journal of the Brazil Society of Mechanics Sciency and Engineering.Jan/Mar 2006, v. 28, n 1/1.
- COTTA, C.. **Problemas Inversos de condução de calor em meios heterogêneos. Análise teórico-experimental via transformação integral, inferência Bayesiana e termografia por infravermelho.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/ COPPE. Rio de Janeiro. 2009.
- CRONEMBERGER, P.O. **Problema inverso de estimativa de parâmetros de propelentes a partir da balística interna de uma arma.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2012.
- DREHMER, L.R.C. **Otimização de parâmetros concentrados de suspensão para conforto e segurança veicular.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.
- ESPOSITO, A. **Programação paralela e sequencial aplicada à otimização de estruturas metálicas com o algoritmo PSO.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.
- FERREIRA, H. T. **Determinação das frequências naturais e modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional em Matlab-Simulink.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.2003.
- FERREIRA, M.D.C., VENTURINI, W.S. **Utilização do acoplamento MEC/MEF e de técnicas de CID em problemas inversos.**Cadernos de Engenharia de Estruturas. São Carlos, 2009.v.11. p.167-170. 2009. ISSN 1809-5860.
- FISHER, D., ISERMANN, R. **Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions. Control Engineering Practice.** 2004. v.12. p. 1353-1367. DOI: :10.1016/j.conengprac.2003.08.003.
- GILLESPIE, T.D. **Fundamentals of vehicle dynamics.** Pensylvania: Society of Automotive Engineers. 1992.
- GLOBALSECURITY.ORG,2014.Disponível:<http://www.globalsecurity.org/military/world/europe/suerav.htm> [capturado em 24 nov. 2014].
- GOGA, V., KLUCIK, M. **Optimization of vehicle suspension parameters with use of evolutionary computation.** Science Direct Journal Procedia Engineering, 2012.v. 48. p. 174-179.

- HADA, M.K.; MENON, A.; BHAVE, S.Y. **Optimization of an active suspension force controller using Genetic Algorithm for random input.** Defence Science Journal, 2007. v. 5, .n.5. p. 691-706.
- HASSAN, R., COHANIM, B., WECK, O. **A comparison of Particle Swarm Optimization and the Genetic Algorithm.** In: 46<sup>th</sup> AIAA/ASME/SCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Austin, Texas, 2005.
- HELWIG, S. **Particle Swarms for Constrained Optimization.**2010. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de Erlangen-Nurnberg. Alemanha.2010.
- HEISLER H. **Advanced vehicle technology.** Elsevier Science. 2. ed. 2002.
- HOHL G.H. **Military terrain vehicles.** Journal of Terramechanics, 2006. v. 44. p. 23–34.
- HOSSEINLOO, A.H., VAHDATI, N., YAP, F.F. **Performance of spade-less wheeled military vehicles with passive and semi-active suspensions during mortar firing.** Vehicle System Dynamics, 2012. DOI: 10.1080/00423114.2012.675076.
- IME. Instituto de Matemática e Estatística. Disponível: [http://www.ime.usp.br/~oda/contents/01Matem%20e%20Estatistica/01Sistemas%20Dinamicos/17\\_Desbal\\_Excit\\_Base\\_Isol\\_Vibra.pdf](http://www.ime.usp.br/~oda/contents/01Matem%20e%20Estatistica/01Sistemas%20Dinamicos/17_Desbal_Excit_Base_Isol_Vibra.pdf) [capturado em: 05 nov. 2014].
- IMINE, H., FRIDMAN, L., MADANI, T. **Identification of vehicle parameters and estimation of vertical forces.** Internacional Journal of Systems Science. 2014. DOI: 10.1080/00207721.2014.886741.
- IMINE, H. MADANI, T. **Heavy vehicle suspension parameters identification and estimation of vertical forces: experimental results.** International Journal of Control. 2014. DOI: 10.1080/00207179.2014.951882.
- IWANIEC, J. **Identification of car suspension system parameters on the basis of exploitational measurements.** Diagnostyka. 2013. v.4, n. 2. p. 11-16.
- JABEEN, S.D. **Vibration optimization of a passive suspension system via Genetic Algorithm.** International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing. 2013. v. 4, n. 1. p. 1-21. DOI: 10.1142/S1793962312500225
- JAZAR, R.N. **Vehicle dynamics theory and application.** Springer. 2008.
- JUNIOR, L.M.P.F. **Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo Macpherson.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2006.
- JUNIOR, V.A. **Parametrização dos valores de geometria do sistema de suspensão de veículos de passageiros.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

- KABBANY, A.S., SERRANO, R. **Effect of number of wheels on high speed UGV traversability: online terrain assessment approach.** International Journal of Automotive Technology, 2013.v. 14, n. 2. p. 249-257.
- KADIR, Z.A., NAIEM, M.A.Md., BOHARI, B., JALIL K.A., YUSOFF M.F.M. **Validation of 2DOF tracked vehicle model due to road disturbance.** Journal of Mechanical Engineering, 2012.v. 1, n. 3.
- KAIPIO, J., SOMERSALO, E. **Statistical inverse problems: discretization, model reduction and inverse crimes.** Science Direct Journal of Computational and Applied Mathematics, 2007. v. 198. p. 493-504.
- KRAFT, S., PUEL, G. AUBRY, D., FUNFSCHILLING, C. **Improved calibration of simulation models in railway dynamics: application of a parameter identification process to the multi-body model of a TGV train.** Vehicle System Dynamics, 2013, v. 00. n. 6. p. 1-21. DOI: 10.1080/0042311YYxxxxxxx.
- LI, P., GOODALL, R., WESTON, P., LING, C.S., GOODMAN, C., ROBERTS, C. **Estimation of railway vehicle suspension parameters for condition monitoring.** Control Engineering Practice. 2007, v. 15, p. 43-55. DOI: 10.1016/j.conengprac.2006.02.021.
- LIANG, Y., ZHAO, Y., WU, S., XUE, X. **Optimal vibration controller design for tracked vehicle half-car suspension systems.** Journal of Computational Systems. 2014. DOI: 10.12733/jcis9786.
- LONGMAN. **Dictionary of contemporary english for advanced learners.** New Edition. Pearson Longman. 2009.
- MACHADO, H.A., ORLANDE, H.R.B. **Inverse problem for estimating the heat flux to a non-newtonian fluid in a parallel plate channel.** Journal of the Mechanical Society of Mechanical Sciences, 1998. v. 20. n. 1. p. 51-61.
- MARJANEN Y., **Validation and improvement of the ISO 2631-1 (1997) standard method for evaluating discomfort from whole-body vibration in a multi-axis environment.**2010.Tese (PHD ). LoughboroughUniversity.Inglaterra. 2010.
- MARZBANRAD, J., MOHAMMADI, M., MOSTAANI, S. **Optimization of a passive vehicle suspension system for ride comfort enhancement with different speeds based on design of experiment method (DOE) method.** Journal of Mechanical Engineering Research, Março/2013.v. 5, n.3. p. 50-59.
- MEDEIROS, J.A.C.C. **Enxame de partículas como ferramenta de otimização em problemas complexos de engenharia nuclear.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Rio de Janeiro. 2005.

- MEHDIZADEH, S.A. **Optimization of passive tractor cabin suspension system using ES, PSO and BA.** Journal of Agricultural Technology, 2015.v. 11, n. 3. p. 595-607.
- MORAES, M.B.C., NAGANO, M.S. **Cash balance management: A comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization.** Acta Scientiarum Technology, 2012.v. 34, n. 4. p. 373-379.
- OZISIK M.N., ORLANDE H. R.B. **Inverse heat transfer.** New York: Taylor & Francis. 2000.
- PATEL,C.B., GOHIL, P.P., BORHADE, B. **Modelling and vibration analysis of a road profile measuring system.** International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2010.v.1. p.13-28. ISSN: 2180-1606.
- PATIL, M.S.; HADA, M.K.; BHAVE, S.Y.; JOSHI, S.G. **Vibration isolation and transmissibility characteristics of passive sequential damper.** Defence Science Journal, 2004. v. 54, n. 1. p. 39-51.
- PINHEIRO, R.P.F., NETO, A.J.S., ROBERTY, N.C. **Análise de sensibilidade para problema inverso de transferência radiativa.** In: 10<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- RAVISHANKAR, M.K., SUJATHA, C. **Stationary response of a military tracked vehicle.** In: 14<sup>th</sup> International Congress on Sound & Vibration, Cairns, Australia, 2007.
- RODRIGUES, F.A. **Identificação simultânea do termo-fonte e do coeficiente de difusão pelo método do gradiente conjugado de estimativa de função.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE. Rio de Janeiro. 2002.
- RODRIGUES, J.F.S. **Cálculo e avaliação dos parâmetros da rigidez auxiliar a rolagem de uma suspensão dianteira mecânica.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.
- ROSENDO, M.. **Um algoritmo de otimização por nuvem de partículas para resolução de problemas combinatórios.** 2010. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.
- SANTOS, R.P.B., MARTINS, C.H., SANTOS F. L. **Simplified particle swarm optimization algorithm.** Acta Scientiarum Technology, 2012.v.34, n. 1.p. 21-25.
- SANTOS, F.R., PEREIRA, F.R., CARVALHO, G., NETO, A.J.S.N. **Abordagem de problemas inversos para a caracterização térmica de materiais.** Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional. Brasil, 2002. Disponível: [http://www.sbmac.org.br/bol/boletim\\_2002/santos-pereira-carvalho-silvaneto-4emc.pdf](http://www.sbmac.org.br/bol/boletim_2002/santos-pereira-carvalho-silvaneto-4emc.pdf) [capturado em: 22 jan. 2015]

- SHIRAHATT, A., PRASAD, P.S.S., PANZADE, P., KULKARNI, M.M. **Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding.** ABCM, 2008.v.30, n.1.p.66-76.
- STOECKER, W. F. **Design of thermal systems.** McGraw-Hill. Kogakusha. 1971.
- SUN, H-K., LIU, Y-T., CHEN, C-G. **Dynamic analysis of a vehicular-mounted automatic weapon-planar case.** Defence Science Journal, 2009.v. 59, n. 3. p. 265-272.
- THE PANDUR II 6x6 and 8x8 wheeled AFV Family. Military Technology, 2005. v. 29. n. 5. p. 48-51.
- THITE, A.N., BANVIDI, S., IBICEK, T., BENNET, L. **Suspension parameter estimation in the frequency domain using a matrix inversion approach.** Vehicle System Dynamics, 2011. v. 49. n. 12. p. 1803-1822.
- TUNG, S-L., JUANG, Y-T., LEE, W-H., SHIEH, W-Y., WU, W-Y. **Optimization of the exponential stabilization problem in active suspension system using PSO.** Expert Systems with Applications, 2011. v. 38. p. 14044-14051.
- TUSSET A.M.. **Controle ótimo aplicado em modelo de suspensão veicular não-linear controlada através de amortecedor magneto-reológico.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2008.
- VALLE, Y., VENAYAGAMOORTHY, G.K., MOHAGHEGHI, S., HERNANDEZ, J-C., HARLEY, R.G. **Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems.** IEEE Transactions on Evolutionary Computation, April 2008.v.12, n. 2.p 171-195.
- VELHO, H.F.C. **Problemas Inversos: conceitos básicos e aplicações.** In: 4<sup>th</sup> Encontro de Modelagem Computacional, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- VENTER G. **Review of optimization techniques** – Encyclopedia of Aerospace Engineering. Stellenbosch University. Department of Mechanical and Mechatronic Engineering. South Africa. 2010.
- XUE, P. CHAI, X., ZHENG, S. **Research on vehicle diagnosis based on state-space method.** Artificial Intelligence Research, 2015, v. 4, n. 2. p. 55-60. DOI: 10.5430/air.v4n2p55.
- WANG, K. **Dynamic analysis of a tracked snowplowing vehicle and assessment of ride quality.** 1998. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas) - Concordia University. Montreal, Quebec, Canada. 1998.
- WIRGIN, A. **The inverse crime.** Cornell University. New York. United States of America. 2008. Disponível: <http://www.arxiv.org/abs/math-ph/0401050> [capturado em: 23jan. 2015].

WONG, J.Y. **Theory of ground vehicles.** 3<sup>th</sup>ed. Copyright by John Wiley & Sons, Inc. 2001.

ZENG, Y., LIU, S., E, J. **Neuron PI control for semi-active suspension system of tracked vehicle.** Journal of Central University of Technology. 2011. v. 18, n. 2. p 444-450.  
Doi:10.1007/s11771-011-0716-4.