

APLICAÇÃO DA ROTINA INVERSA R2W NA ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DA SUSPENSÃO PASSIVA DE UM VEÍCULO MILITAR

LUCAS CASTRO SOUSA^{1*}

¹Mestrando em Engenharia Mecânica, IME, Rio de Janeiro-RJ, lucascastro.mec@gmail.com

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

RESUMO: A aplicação da rotina inversa R2W (Random Restricted Window) é empregada na estimativa dos coeficientes de amortecimento e rigidez da suspensão passiva de uma viatura militar. Para tal, é empregado o modelo de 1/4 de veículo, avaliando-se o deslocamento do chassi da viatura quando a mesma ultrapassa uma lombada. São utilizados dados pseudoexperimentais, aplicando-se ruídos de origem randômica na solução numérica do modelo computacional, resolvida pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem. Assim, são verificados os tempos computacionais, erros relativos entre os resultados gerados e os valores reais, além do número de interações.

PALAVRAS-CHAVE: rotina inversa, R2W, estimativa de parâmetros, suspensão passiva.

APPLICATION OF THE REVERSE ROUTINE R2W IN THE ESTIMATION OF THE COEFFICIENTS OF THE PASSIVE SUSPENSION OF A MILITARY VEHICLE

ABSTRACT: The application of the R2W (Random Restricted Window) routine is used to estimate the damping and stiffness coefficients of the passive suspension of a military vehicle. To do this, the ¼ car model is used, evaluating the displacement of the vehicle chassis when it passes over a spine. Pseudoexperimental measures are applied, introducing random noises in the numerical solution of the computational model, which is solved by the Runge-Kutta method of 4th order. Thus, the computational times, relative errors between the generated results and the actual values, besides the number of interactions, are verified.

KEYWORDS: inverse routine, R2W, parameter estimation, passive suspension.

INTRODUÇÃO

Os veículos militares são caracterizados dentre outros motivos, por terem uma maior facilidade de trafegar sobre terrenos acidentados (Carvalho, 2015). Assim, durante seu tráfego, vibrações são impostas ao veículo devido à ação de forças externas e internas que são denominadas entradas no sistema (Carvalho, 2015; Oliveira, 2018). Com isso, o sistema de suspensão tem o dever de filtrar as vibrações impostas pelo movimento do veículo, afetando diretamente o conforto e dirigibilidade (Milliken & Milliken, 1995).

No entanto, em veículos militares, os esforços no sistema de suspensão são extremos se comparados à veículos convencionais (Ata & Oyadiji, 2014). Sendo assim, devido ao fato de veículos militares deverem estar durante o maior tempo possível em operação, sem grandes reparos, se faz necessário o estudo de testes com a intenção de avaliar o comportamento dinâmico destes veículos (caldeira, michelle). Visto que a falha precoce de componentes veiculares de caráter militar pode ser desastrosa em situações de combate.

Dessa forma, são aplicadas técnicas de otimização, onde ao serem vinculadas à modelos físico-matemáticos, permitem a estimativa de parâmetros necessários para o estudo da dinâmica veicular. A obtenção de dados sobre veículos militares é sempre envolta em mistério, visto que não são dados encontrados com facilidade em manuais ou na literatura específica. Fato este potencializado quando o veículo é adquirido por outro país que não o mesmo de fabricação (Oliveira, 2018).

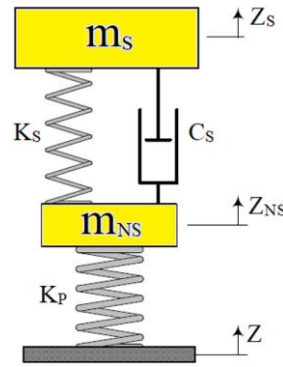
Um campo de prova análogo ao existente em testes convencionais é abordado neste trabalho, sendo verificado como a massa suspensa do veículo (chassi) se comporta durante a passagem sobre uma lombada de forma padronizada. Com isso, o objetivo do trabalho visa verificar em tela o desempenho do método estocástico de otimização R2W (Random Restricted Window) na estimativa dos coeficientes de amortecimento e rigidez do veículo militar HMMWV.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um dos modelos físico-matemáticos mais comumente encontrados na literatura é o denominado modelo de 1/4 de carro (Figura 1), o qual é caracterizado por ser um modelo com dois graus de liberdade, constituídos de: deslocamento na direção vertical da massa suspensa (1/4 da massa total do chassi) e deslocamento vertical da massa não suspensa (massa de uma das rodas (Milliken & Milliken, 1995; Jazar, 2014).

São adotados como delimitações no estudo que: o chassi, bem como a roda e o terrenos são considerados rígidos, não são levados em consideração os movimentos de rolagem (roll) e guinada (pitch), todos os coeficientes de amortecimento e rigidez são considerados constantes durante todo o tempo de simulação, todo o conjunto de 1/4 de carro é considerado igual para todas as 4 rodas do veículo. Por fim, a única perturbação de base considerada é uma lombada padronizada.

Figura 1. Modelo físico-matemático, Jazar (2014).



A formulação matemática é dada por:

$$m_s \cdot \ddot{Z}_s + C_s \cdot (\dot{Z}_s - \dot{Z}_{NS}) + K_s \cdot (Z_s - Z_{NS}) = 0 \quad (1)$$

$$m_{NS} \cdot \ddot{Z}_{NS} + C_s \cdot (\dot{Z}_{NS} - \dot{Z}_s) + K_s \cdot (Z_{NS} - Z_s) + K_p \cdot (Z_{NS} - Z) = 0 \quad (2)$$

Onde,

m_s é correspondente a 1/4 da massa do chassi, m_{NS} corresponde à massa de uma das rodas do veículo (massa suspensa), C_s e K_s são os coeficientes de amortecimento e rigidez da suspensão, respectivamente, K_p corresponde ao valor da rigidez do pneu, Z_s é o deslocamento na direção vertical da massa suspensa, Z_{NS} o deslocamento na direção vertical da roda (massa não suspensa) e Z é a perturbação de base dada pela lombada.

Assim, seguindo o trabalho de Sousa (2018) é definido que o veículo passa sobre uma lombada de 1,5 m de extensão e 0,08 m de altura a partir de um instante inicial $t=0,5$ s, apresentando uma velocidade constante e longitudinal de 10 km/h. A Equação 3, apresenta a modelagem adotada:

$$Z(t) = \begin{cases} \frac{h}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{l} \cdot t\right) \right], & 0,5 \leq t \leq 0,5 + \frac{l}{v} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

Onde, v é a velocidade longitudinal do veículo, h é a altura da lombada em estudo, l a extensão da lombada e t o tempo.

O método R2W foi desenvolvido e proposto por Câmara & Neto (2008) para a resolução de problemas inversos formulados implicitamente.

Neste método, uma população é gerada aleatoriamente dentro de uma região do domínio denominada janela e a cada geração, uma nova população é criada em torno do indivíduo associado ao menor valor da função objetivo S_i^* (Ribeiro et al., 2015).

A Equação 4 apresenta o procedimento iterativo para a atualização de cada indivíduo da população.

$$\zeta_i = \zeta_{iL} + R \cdot (\zeta_{iH} - \zeta_{iL}) \quad (4)$$

Onde, ζ_{iL} e ζ_{iH} são respectivamente, o menor e o maior valor do parâmetro, os quais limitam os limites da janela de busca, sendo definidos pelas Equações 5 e 6 (Carvalho, 2015). E ainda, tem-se R, um número randômico com distribuição uniforme, entre zero e um.

$$\zeta_{iL} = S_i^* - \delta \cdot (S_i^*) \quad (5)$$

$$\zeta_{iH} = S_i^* + \delta \cdot (S_i^*) \quad (6)$$

Pode-se notar a presença do fator de restrição δ , o qual restringe o tamanho da janela. Neste trabalho é adotado o valor $\delta=0,05$, para este fator.

Os dados experimentais podem ser obtidos através de dados denominados pseudoexperimentais, os quais são obtidos mediante a solução direta do problema, fazendo uso de valores pré-conhecidos para cada um dos parâmetros desconhecidos (Sousa, 2018). Dessa forma, as medidas pseudoexperimentais (Y_{exp}) são avaliadas de acordo com a Equação 7:

$$Y_{exp} = Y_{exato} + E \cdot \omega \cdot \max |Y_{exato}| \quad (7)$$

Onde, Y_{exato} é o resultado da problemática de forma direta, utilizando os valores reais dos parâmetros desconhecidos, E é o nível de ruído a ser introduzido nessa solução (1%, 5% e 10%, para este trabalho) e ω é um número aleatório, apresentando distribuição normal entre os valores de -1 e 1.

A função objetivo definida é verificada na Equação 8 e é caracterizada pela diferença quadrática entre as medidas estimadas e as medidas pseudoexperimentais.

$$S(K_S, C_S) = \sum_{i=1}^{It} [Y_i - Z_{\zeta_i}(K_S, C_S)]^2 \quad (8)$$

Onde, It é a quantidade total de medições.

A ferramenta MATLAB®, versão R2017b foi empregada para a simulação computacional utilizando um computador com Intel Core I5 e 8GB de memória RAM. Aliado a isso, o método de Runge-Kutta de 4ª ordem, foi empregado para a resolução do equacionamento diferencial de 2ª ordem.

Assim, para o modelo computacional, dois critérios de parada foram designados. O primeiro consiste no cumprimento da relação presente na Equação 9 por 30 iterações consecutivas.

$$|S(K_S^k, C_S^k) - S(K_S^{k-1}, C_S^{k-1})| \leq 10^{-3} \quad (9)$$

O segundo critério de parada adotado, leva em consideração o denominado princípio da discrepância, onde o valor da função objetivo deve ser menor que a tolerância adotada (Ozisk, 2000).

$$|S(K_S^k, C_S^k)| \leq 10^{-3} \quad (10)$$

Os parâmetros utilizados, baseiam-se no artigo desenvolvido por Liu et al. (2003), acerca da viatura militar HMMWV e estão listados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do modelo de dinâmica vertical

Parâmetros	Símbolo	Valor
Massa suspensa	m_S	803 kg
Massa não suspensa	m_{NS}	98 kg
Coefficiente de rigidez da suspensão	K_S	63528 N.m ⁻¹
Coefficiente de amortecimento da suspensão	C_S	9509 N.s.m ⁻¹
Rigidez do pneu	K_P	204394 N/m

RESULTADOS

O método R2W requer que seja dado um intervalo de busca da resposta ótima (solução do problema) dessa forma foram definidos os intervalos de [5000, 80000] em N.m⁻¹ para o coeficiente de rigidez, e [500, 15000] para o coeficiente de amortecimento em N.s.m⁻¹.

Os resultados gerados encontram-se listados na Tabela 2, variando-se além dos níveis de ruído o número da população (20 e 40 indivíduos).

Tabela 2: Resultado gerados utilizando a rotina inversa R2W

Nº Pop.	Ruído	K_S	C_S	Erro relativo K_S	Erro relativo C_S	S	Iteração	t (s)
20	1%	63527,50	9527,71	0,0008%	0,1968%	0,0010	51	55,54
	5%	63249,39	9541,24	0,4386%	0,3391%	0,0271	55	56,40
	10%	64026,20	9390,06	0,7842%	1,2542%	0,1097	57	58,09
40	1%	63463,57	9505,49	0,1014%	0,0370%	0,0011	35	62,66
	5%	63361,81	9506,23	0,2616%	0,0292%	0,0270	50	100,24
	10%	62960,30	9549,14	0,8936%	0,4222%	0,1109	55	116,14

Pode-se afirmar que ao se aumentar o número de membros na população, um menor número de iterações é necessário para satisfazer os critérios de parada adotados, devendo-se à maior probabilidade de se alcançar o menor valor global. No entanto, devido ao próprio procedimento computacional um maior tempo é requerido.

Além disso, verifica-se que quanto maior o valor de ruído introduzido, maiores são os erros relativos entre o valor encontrado e o valor real do parâmetro estimado, fazendo com que maiores valores da função objetivo sejam encontrados (Figuras 3 e 5). E ainda, maiores são os tempos computacionais obtidos com o maior nível de ruído associado, devendo-se ao fato de ser mais difícil de se estabelecer os critérios de parada, visto que ruído, afeta a solução por rotinas inversas.

As Figuras 2 e 4 apresentam o deslocamento da massa suspensa (chassi) em função do tempo para o nível de ruído de 10% e para as populações de 20 e 40 membros, respectivamente.

Figura 2. Deslocamento do chassi – Pop. 20

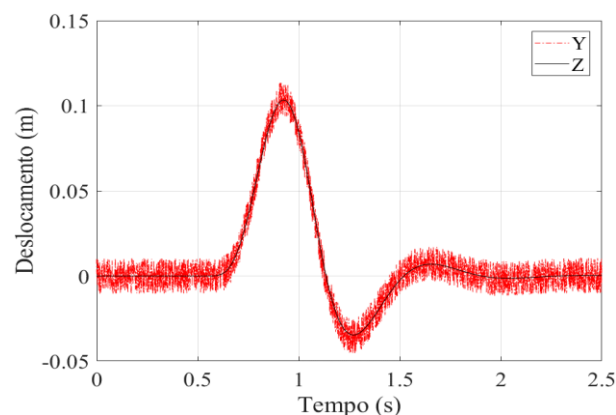


Figura 3. Evolução da função objetivo – Pop. 20

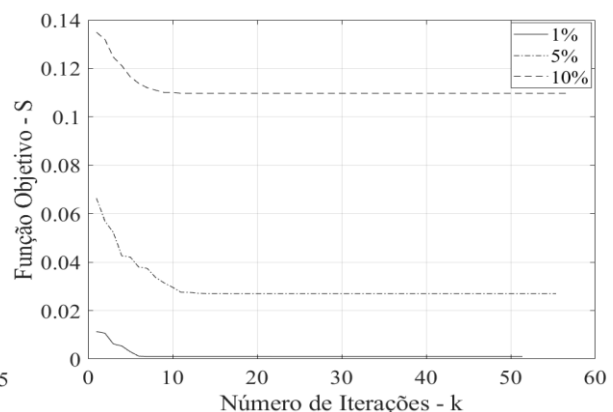


Figura 4. Deslocamento do chassi – Pop. 40

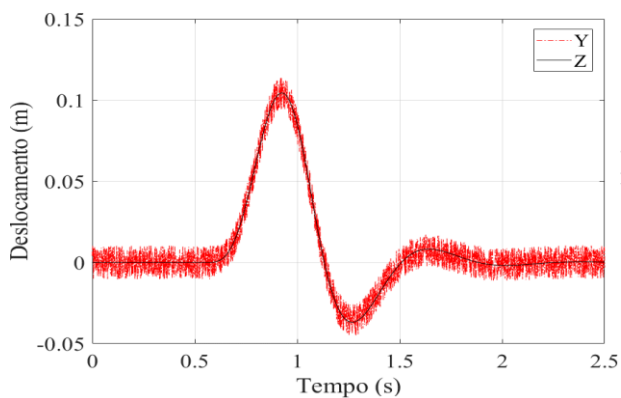
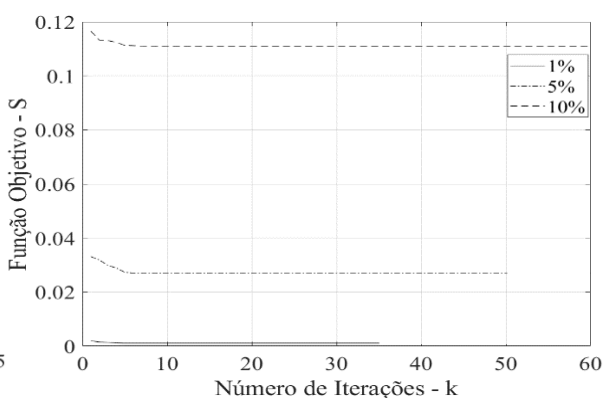


Figura 5. Evolução da função objetivo – Pop. 40



Nota-se ainda nas Figuras 2 e 4 que as curvas geradas pelo método R2W estão de acordo os dados pseudoexperimentais (curva com ruído), representando assim a convergência do modelo.

CONCLUSÃO

No trabalho aqui desenvolvido, foi utilizada a técnica inversa de otimização R2W com o objetivo de se estimar parâmetros da suspensão de uma viatura militar, fazendo uso do modelo de dinâmica vertical denominado 1/4 de carro.

A solução da problemática direta foi obtida a partir de medidas pseudoexperimentais do deslocamento do chassi em função do tempo, com a introdução de ruídos (1%, 5% e 10%).

As soluções geradas puderam validar a aplicação conjunta da rotina de otimização R2W com o modelo de 1/4 de carro na busca de parâmetros desconhecidos, tornando possível a realização de testes reais de campo para a obtenção de dados experimentais, como um próximo passo para o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ata, W. G. K.; Oyadiji, S. An investigation into the effect of suspension configurations on the performance of tracked vehicles traversing bump terrain. *Vehicle System Dynamics*, v. 52, n. 7, p. 969-999, 2014.
- Câmara, L. D. T.; Neto, A. J. S. Inverse Stochastic Characterization of Adsorption Systems by a Random Restricted Window (R2W) Method. In: *International Conference Engineering Optimization*, 1, 2008, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: EngOpt, 2008.
- Carvalho, M. S. Estimativa de suspensões passivas de veículos militares empregando um modelo de 1/2 carro. Rio de Janeiro: IME. 2015. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- Jazar, R. N. *Vehicle dynamics: theory and application*. 2.ed. New York: Springer, 2014.
- Liu, Y.; Gordaninejad, F.; Evrensel, C. A.; Dogruer, U.; Yeo, M.; Karakas, E. S. Temperature dependent skyhook control of HMMWV suspension using a failsafe magneto-rheological damper. *Smart Structures and Materials*, v. 5054, n. 1, p. 332-340, 2003.
- Milliken, W. F.; Milliken, D. L. *Race car vehicle dynamics*. 1.ed. Warrendale: SAE, 1995.
- Oliveira, A. N. Estimativa de parâmetros e análise da dinâmica vertical de um veículo militar 8WD. Rio de Janeiro: IME. 2018. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).
- Ozisik, M. N. de.; Orlande, H. R. B. *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*. 1.ed. New York: CRC Press, 2000.
- Ribeiro, M. A. C.; Câmara, L. D. T.; Neto, A. J. S. Validação do método estocástico R2W na obtenção de ótimos globais de funções não-lineares. *Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis*, v. 9, n.1, p. 42-53, 2015.
- Sousa, L. C.; Caldeira, A. B.; Costa Neto, R. T. Estimativa de parâmetros da suspensão passiva de um veículo utilizando o modelo de 1/4 de carro. In: *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, X, 2018, Salvador. Anais... Salvador: CONEM, 2018.