



# ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA SUSPENSÃO DO TIPO DUPLO A

**Palavras-Chave:** SUSPENSÃO AUTOMOTIVA, DINÂMICA VEICULAR, OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS

**Autores:**

VINÍCIUS EDUARDO SEDRAN, DSI – FEM

Prof. Dr. GREGORY BREGION DANIEL, DSI – FEM

---

## INTRODUÇÃO:

O desenvolvimento da economia brasileira tem como um de seus frutos o avanço do transporte rodoviário. Com a abertura e expansão deste mercado manifestou-se novas necessidades relacionadas à busca por inovações tecnológicas concernentes a este ramo. Desta forma, fez-se necessário buscar por soluções advindas do embasamento acadêmico para que houvesse a consolidação e contínua evolução do mercado automobilístico.

O mercado brasileiro requer soluções de engenharia que sejam robustas, eficientes e, principalmente, economicamente viáveis de modo que se faça possível suportar as condições precárias das rodovias nacionais. Para que um automóvel disponha destas características requisitadas pelo mercado nacional é de suma importância que haja um projeto, fundamentado por métodos científicos, para cada subsistema que compõem o automóvel.

Assim sendo, um dos principais subsistemas que compõem o sistema principal (veículo) é o conjunto de suspensão o qual faz a interação entre a massa suspensa e a não suspensa do automóvel. Ademais, este conjunto tem como propósito filtrar as irregularidades do solo que chegam ao veículo, afetando o seu comportamento e auxiliando nas ações do piloto.

Na atualidade, o sistema de suspensão se mostra uma área de grande relevância para a engenharia e, com isso, fomenta o seu desenvolvimento tecnológico. Os estudos voltados a essa área promovem, essencialmente, a busca por atender aos desejos do consumidor que se traduzem em um carro confortável, seguro e que tenha bom desempenho dinâmico.

Outro ponto importante que deve ser ressaltado com relação ao progresso científico nesse setor é o desenvolvimento de suspensões para carros elétricos que são considerados o futuro da mobilidade urbana e, em termos técnicos, possuem características dinâmicas distintas dos carros a combustão que propiciam uma alteração do centro de gravidade do veículo e, portanto, demanda novos ajustes nos projetos de suspensão.

Ainda assim, existem alguns avanços científicos relacionados à suspensão automotiva que exigem uma atenção especial em seu desenvolvimento, sendo uma delas as suspensões com

recuperação de energia que, por se tratarem de uma novidade no mercado, requerem novas configurações e ajustes para maximizar o ganho de energia. Além disso, também vale citar as suspensões eletrônicas utilizadas atualmente para fornecer ao condutor uma melhor experiência ao dirigir de modo que o mesmo possa selecionar o modo de condução que deseja promovendo, assim, uma alteração eletrônica na regulagem da suspensão.

Neste contexto, destaca-se então os crescentes avanços relacionados ao desenvolvimento de suspensões automotivas, seja para atender as novas demandas advindas do mercado quanto a necessidade de concepção de novos produtos através de inovações tecnológicas. Desta forma, o presente projeto aborda a análise dinâmica e otimização de suspensão automotiva do tipo duplo A, a fim de determinar os parâmetros ótimos deste subsistema frente às diferentes situações, tais como dirigibilidade, estabilidade e conforto, considerando ainda diferentes características de veículos.

## METODOLOGIA:

Para realizar a análise cinemática da suspensão Duplo A e verificar como os seus parâmetros variam a partir da sua atuação (movimentação da roda), torna-se necessário avaliar primeiramente as equações de loop de posição que representam este sistema. Dessa forma, assumindo a suspensão Duplo A como um sistema que pode ser representado pelo mecanismo 4-barras, é pertinente utilizar-se da modelagem matemática realizada neste sistema para que se possa efetuar análises relativas à posição, velocidade e aceleração do mecanismo. Para isso, é usado como base de estudo a suspensão representada pela Figura 1.

A análise bidimensional simplificada do mecanismo com as coordenadas generalizada ( $q$ ) e secundárias ( $A_2$  e  $A_3$ ) pode ser visualizada na Figura 2. A partir dessa representação esquemática desenvolveu-se as Equações 1 e 2 de loop que representam o ponto de partida para a análise cinemática completa do mecanismo.

$$f_1(q, A_2, A_3) = C_1 \cos(q) + C_2 \sin(A_2) + C_3 \cos(A_3) - X_{O_1} \quad (1)$$

$$f_2(q, A_2, A_3) = C_1 \cos(q) + C_2 \sin(A_2) + C_3 \cos(A_3) - X_{O_1} \quad (2)$$

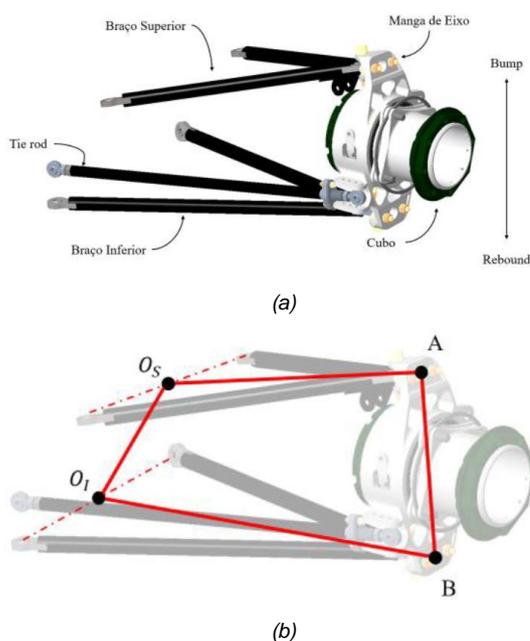


Figura 1 – (a) Sistema de Suspensão; (b) Representação Esquemática do mecanismo quatro barras aplicado ao sistema de suspensão – fonte: Elaboração Própria.

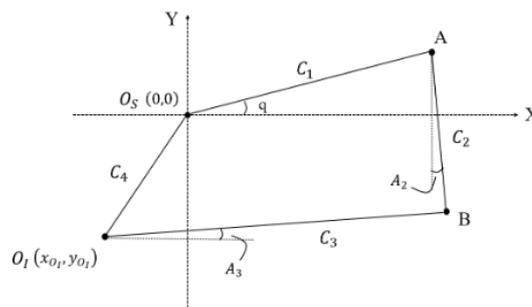


Figura 2 – Representação Esquemática do mecanismo quatro barras que modela a suspensão Duplo A – fonte: Elaboração Própria.

Com base nisso, a análise de posição do mecanismo foi realizada através do método numérico de Newton-Raphson, no qual, a partir da coordenada generalizada  $q$ , encontra-se as coordenadas secundárias ( $A_2$  e  $A_3$ ) do sistema.

Após efetuada a análise de posição, introduziu-se a análise de velocidade do mecanismo 4-barras e obteve-se a Equação 3 para a velocidade das coordenadas secundárias do sistema.

$$\begin{Bmatrix} \dot{A}_2 \\ \dot{A}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{A_2} \\ K_{A_3} \end{Bmatrix} \dot{q} = \begin{Bmatrix} \frac{C_1 \sin(q-A_3)}{C_2 \cos(A_2-A_3)} \\ \frac{C_1 \cos(q-A_2)}{C_3 \cos(A_2-A_3)} \end{Bmatrix} \dot{q} \quad (3)$$

Em seguida, com o intuito de encontrar a aceleração das coordenadas secundárias, pode-se diferenciar novamente a equação obtida da velocidade de modo a obter a Equação 4 e completar a análise cinemática do mecanismo.

$$\begin{Bmatrix} \ddot{A}_2 \\ \ddot{A}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{A_2} \\ K_{A_3} \end{Bmatrix} \ddot{q} + \begin{Bmatrix} L_{A_2} \\ L_{A_3} \end{Bmatrix} \dot{q}^2 \quad (4)$$

Onde:

$$L_{A_2} = \frac{dK_{A_2}}{dq} = C_1 C_2 \frac{[\cos(q-A_3)(1-K_{A_3}) \cos(A_2-A_3) + \sin(q-A_3) \sin(A_2-A_3)(K_{A_2}-K_{A_3})]}{[C_2 \cos(A_2-A_3)]^2} \quad (5)$$

$$L_{A_3} = \frac{dK_{A_3}}{dq} = C_1 C_3 \frac{[-\sin(q-A_2)(1-K_{A_2}) \cos(A_2-A_3) + \cos(q-A_2) \sin(A_2-A_3)(K_{A_2}-K_{A_3})]}{[C_3 \cos(A_2-A_3)]^2} \quad (6)$$

Antes de iniciar o estudo da dinâmica do mecanismo, desenvolveu-se a análise de ponto de interesse que foi importante principalmente para determinar a energia cinética e a energia potencial de cada corpo representado pelo seu centro de massa. A indicação dos centros de massa de cada uma das barras com relação aos sistemas de coordenadas está representada na Figura 3. Assim, essa análise permitiu obter as coordenadas de posição, velocidade e aceleração dos centros de massa de cada uma das barras e construir um modelo dinâmico da suspensão Duplo A.

A análise dinâmica do mecanismo 4-barras foi realizada considerando o sistema de amortecimento representado pela Figura 4 e, para modelar o seu comportamento dinâmico, foi utilizada a equação de movimento de Eksergian. Esse equacionamento vale-se dos conceitos de que o trabalho realizado por um sistema mecânico é igual a variação da sua energia cinética. Assim,

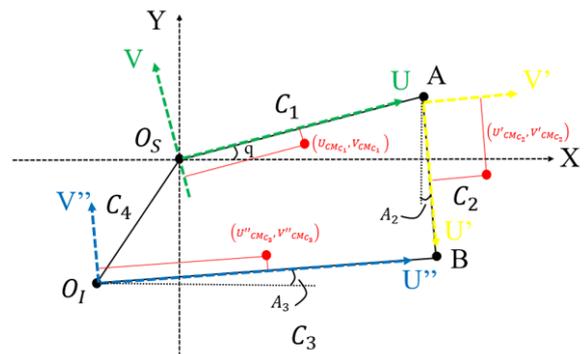


Figura 3 – Representação Esquemática dos centros de massa para análise de ponto de interesse – fonte: Elaboração Própria.

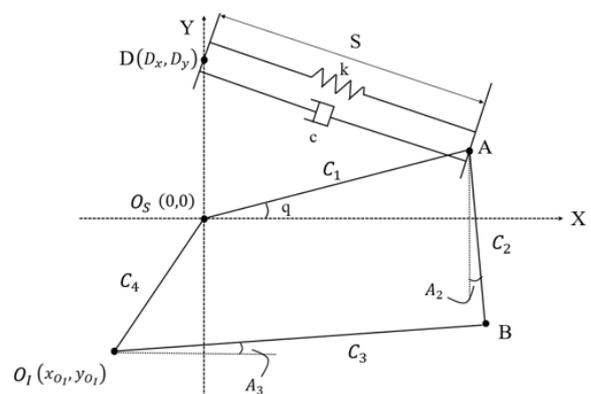


Figura 4 - Ilustração do mecanismo quatro barra com sistema de amortecimento – fonte: Elaboração Própria.

resolvendo a equação diferencial representada pela Equação 7, onde  $J(q)$  é a inércia generalizada,  $\zeta(q)$  é o coeficiente de aceleração normal,  $\frac{dV}{dq}$  é a derivada da energia potencial e  $Q^{NC}$  representa as forças não conservativas do sistema, obtém-se um modelo dinâmico do mecanismo em questão.

$$J(q)\ddot{q} + \zeta(q)\dot{q}^2 + \frac{dV}{dq} = Q^{NC} \quad (7)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A partir desse estudo, obteve-se uma animação 2D da suspensão duplo A e os gráficos de velocidade e aceleração angular das coordenadas secundárias, como mostram, respectivamente, as Figuras 5 e 6.

Esses gráficos revelaram informações valiosas sobre o deslocamento desses pontos ao longo do tempo, contribuindo para a compreensão do comportamento da suspensão.

Além disso, a sua relevância é reiterada, pois não só esclareceu o comportamento do mecanismo de suspensão, mas também foi ferramenta crucial na identificação e quantificação do impacto que adequações de design da suspensão trariam no comportamento do sistema.

A resposta dinâmica desse mecanismo desempenha um papel fundamental na compreensão do comportamento de uma suspensão do tipo Duplo A. Esse sistema é amplamente utilizado em engenharia mecânica e automotiva para suavizar o movimento de um veículo, proporcionando conforto aos ocupantes e estabilidade ao mesmo tempo.

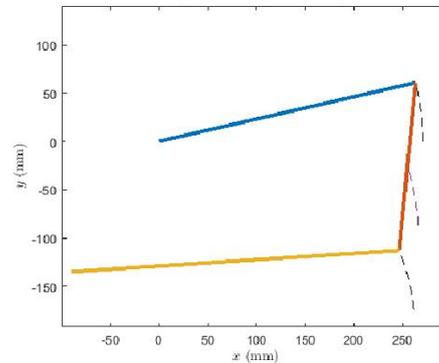


Figura 5 – Animação 2D da suspensão duplo A – fonte: Elaboração Própria.

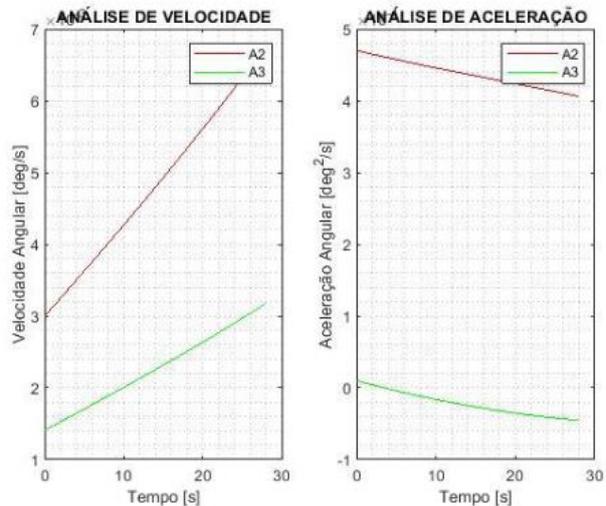


Figura 6 – Velocidade e Aceleração angular das coordenadas secundárias do mecanismo – fonte: Elaboração Própria.

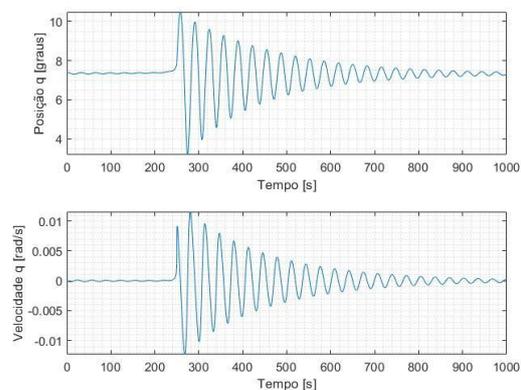


Figura 7 – Resposta dinâmica do sistema de suspensão duplo A – fonte: Elaboração Própria

Ela pode ser analisada em termos de deslocamento e velocidade, como pode ser visto na Figura 7. O deslocamento representa a posição vertical da suspensão em relação à posição de equilíbrio, enquanto a velocidade mostra a taxa de variação do deslocamento ao longo do tempo. Desta forma, em uma superfície irregular, a suspensão irá se deformar para absorver o impacto, resultando em um deslocamento maior e uma velocidade inicial mais alta. À medida que a energia é dissipada pelo amortecedor, a qual é representada pela tendência exponencial de redução do deslocamento, observa-se que a velocidade do conjunto também diminui.

Desta forma, iterou-se diferentes condições com o objetivo de otimizar a resposta do sistema. Ao aumentar o coeficiente da mola observou-se uma diminuição da amplitude de deslocamento do sistema, já para o aumento do coeficiente do amortecedor visualizou-se uma diminuição no tempo de resposta e, por fim, com o acréscimo do comprimento dos braços da suspensão e a consequente inserção de massa no sistema, verificou-se uma maior amplitude de deslocamento do sistema. Essas respostas dinâmicas podem ser visualizadas nas Figuras 8 a 10.

## CONCLUSÕES:

A pesquisa de iniciação científica sobre análise e otimização da suspensão do tipo duplo A foi de extrema relevância para o entendimento do comportamento desse sistema. Através da análise cinemática, foi possível compreender o comportamento da posição, velocidade e aceleração do conjunto. A análise dinâmica, por sua vez, possibilitou entender o impacto dos parâmetros de amortecimento no comportamento geral da suspensão.

Assim, o estudo forneceu conhecimentos fundamentais para a compreensão do comportamento da suspensão do tipo duplo A e como otimizar seus parâmetros, visando melhorar o desempenho, conforto e segurança dos veículos modernos.

## BIBLIOGRAFIA

- Milliken, W. F.; Milliken, D. L.. **Race car vehicle dynamics**. SAE R – 146, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 1995
- Gillespie, T. D.. **Fundamentals of vehicle dynamics**. SAE R – 114, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 1992.
- Norton, R; **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. Brasil: AMGH, 2010. 812 p.

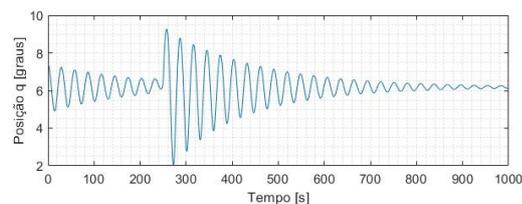


Figura 8 – Resposta dinâmica com o aumento do coeficiente da mola - fonte: Elaboração Própria.

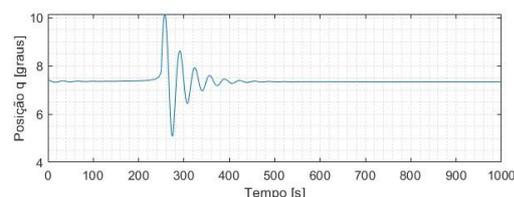


Figura 9 – Resposta dinâmica com o aumento do coeficiente do amortecedor - fonte: Elaboração Própria.

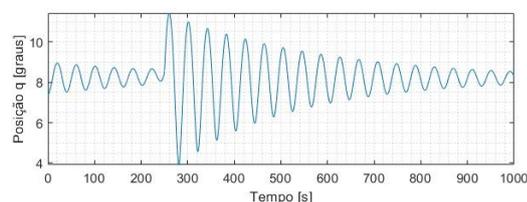


Figura 10 – Resposta dinâmica com o aumento da inércia dos braços da suspensão - fonte: Elaboração Própria.