

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA PLANTA E DO CONTROLADOR DE UMA SUSPENSÃO VEICULAR ATIVA

A. L. Soubhia, analisasoubhia@gmail.com¹

G. Jeuken, gjeuken@gmail.com¹

J. F. Camino, camino@fem.unicamp.br¹

¹Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Resumo. Este artigo propõe a aplicação de técnicas para a solução de problemas de projeto de otimização simultânea dos parâmetros da planta e do controlador para uma suspensão veicular ativa, de forma que o sistema atinja o melhor desempenho possível. Três diferentes estratégias de otimização que resolvem este problema são comparadas: a estratégia sequencial, a estratégia iterativa e a estratégia simultânea. O trabalho se desenvolve da seguinte forma: Primeiramente, a estrutura é modelada. Segundo, o procedimento de otimização estrutural é aplicado. Em seguida, um controlador é projetado usando a estrutura otimizada. Depois, é proposta a metodologia de otimização simultânea dos parâmetros da planta e do controlador. Exemplos numéricos ilustram os problemas de otimização propostos.

Palavras-chave: Otimização Estrutural, Projeto de Controladores, LQR, Otimização Simultânea.

1 INTRODUÇÃO

Projetos de suspensões veiculares ativas têm atraído a atenção de muitos pesquisadores e muitos trabalhos têm sido propostos na literatura (Elmadany and Abduljabbar (1999) e Fathy *et al.* (2003)), de forma a melhorar a dirigibilidade e ao mesmo tempo, minimizar o desconforto do passageiro e maximizar o atrito entre as rodas aumentando a estabilidade.

Um dos primeiros pesquisadores neste campo, A. G. Thompson em (Thompson, 1971) analisou o comportamento dinâmico de um modelo simples de uma suspensão veicular. Em seguida, em (Thompson, 1976) o autor incorporou técnicas de controle ótimo para o mesmo modelo de suspensão, usando um índice de desempenho que representava adequadamente as especificações do projeto.

A técnica de projeto integrado tem o objetivo de encontrar a combinação de parâmetros da planta e do controlador que atinja um melhor desempenho. Existem várias estratégias de otimização que podem ser aplicadas ao problema de projeto integrado (Fathy *et al.*, 2001). As principais estratégias são: as estratégias sequenciais, as estratégias iterativas (Smith *et al.*, 1992), as estratégias bi-level (Rao (1988) e Belvin and Park (1990)) e as estratégias simultâneas (Camino *et al.*, 2003). Deve-se salientar particularidades do problema de otimização simultânea. O projeto simultâneo da estrutura e do controlador são complicados, pois, resulta em problemas não lineares. Além disso, os algoritmos disponíveis são computacionalmente custosos (Jin and Sepulveda (1995); Onoda and Haftka (1987); Grandhi (1989) e Yang and Chen (1996)).

O objetivo deste trabalho é aplicar as técnicas de projeto integrado: sequenciais, iterativas e simultâneas em um modelo quarter-car de uma suspensão veicular. Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na seção 2, é apresentada a modelagem do sistema de uma suspensão veicular. Na seção 3, é apresentado o índice de desempenho utilizado neste trabalho. Na seção 4, é tratado o problema do regulador quadrático ótimo. Na seção 5, são apresentados os algoritmos utilizados para os problemas de otimização. Os resultados numéricos são apresentados na seção 7 e as conclusões e as considerações finais são apresentadas na seção 8.

2 MODELAGEM DO SISTEMA

A suspensão do veículo é representada pelo modelo quarter-car da Figura 1. Este modelo é geralmente adequado em estudos preliminares da dinâmica de um veículo de passeio (Elmadany and Abduljabbar (1999) e Fathy *et al.* (2003)). Apesar de sua simplicidade, o modelo conduz a uma compreensão básica do desempenho de uma suspensão.

Utilizando-se as leis de Newton, as equações de movimento do sistema são dadas por:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1(t) &= c[\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] + k_2[y_2(t) - y_1(t)] - k_1[y_1(t) - y_0(t)] - u(t); \\ m_2 \ddot{y}_2(t) &= u(t) - c[\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)] - k_2[y_2(t) - y_1(t)]; \end{aligned} \quad (1)$$

onde a rigidez da mola e o coeficiente de amortecimento da suspensão são, respectivamente, k_2 e c . O pneu é modelado

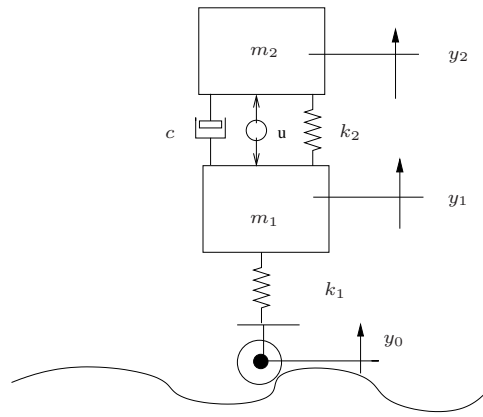


Figura 1. Modelo quarter-car de uma suspensão veicular.

como uma mola de rigidez k_1 . O deslocamento da massa m_1 é $y_1(t)$, o deslocamento da massa m_2 é $y_2(t)$ e $u(t)$ representa uma força de controle ativa. A entrada $y_0(t)$, neste trabalho, é definida como um degrau unitário, ou seja, $y_0(t) = 1$.

A aplicação do degrau unitário ao sistema, imediatamente comprime a mola do pneu e estabelece um novo patamar para o sistema, logo, é conveniente definir as seguintes variáveis de estado,

$$x_1(t) = y_1(t) - y_0(t), \quad x_2(t) = y_2(t) - y_0(t), \quad x_3(t) = \dot{y}_1(t), \quad x_4(t) = \dot{y}_2(t). \quad (2)$$

O sistema acima pode ser representado na forma de estado:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t), \quad (3)$$

com

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k_1/m_1 - k_2/m_1 & k_2/m_1 & -c/m_1 & c/m_1 \\ k_2/m_2 & -k_2/m_2 & c/m_2 & -c/m_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1/m_1 \\ 1/m_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Assumindo que o sistema está em repouso, os valores iniciais destas novas variáveis de estado, no instante imediatamente após a mola do pneu ter sido comprimida, são dados por:

$$x_1(0) = -1; \quad x_2(0) = -1; \quad x_3(0) = 0; \quad x_4(0) = 0. \quad (5)$$

Nos projetos de otimização de suspensões veiculares, os seguintes índices são geralmente considerados: o conforto do passageiro, deformação do pneu (dirigibilidade) e espaço de trabalho da suspensão. Um índice de desempenho muito utilizado na literatura é o índice de desempenho quadrático (Thompson (1976) e Elmadany and Abduljabbar (1999)), que é apresentado a seguir.

3 ÍNDICE DE DESEMPENHO QUADRÁTICO

Nesta seção é apresentado o índice de desempenho utilizado no processo de otimização do sistema apresentado na Fig 1. Este índice é definido como:

$$J = \int_0^{\infty} q_3 u^2(t) + q_1 (y_0 - y_1)^2 + q_2 (y_1 - y_2)^2 dt$$

onde q_1 , q_2 e q_3 são constantes. A utilização deste critério coloca restrições sobre a força $u(t)$, sobre a amplitude dos movimentos da roda ($y_0 - y_1$) e sobre o espaço de trabalho da suspensão ($y_1 - y_2$). A força $u(t)$ que é proporcional a aceleração vertical do corpo, é uma medida do conforto do passageiro.

Em termos das variáveis de estado (2) o índice de desempenho pode ser reescrito na forma:

$$J = \int_0^{\infty} x(t)' Q x(t) + u(t)' R u(t) dt \quad (6)$$

onde as matrizes de ponderação Q e R são dadas por:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 + q_2 & -q_2 & 0 & 0 \\ -q_2 & q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = q_3. \quad (7)$$

Quando os parâmetros da planta são conhecidos, ou seja, quando m_1 , m_2 , k_1 , k_2 e c são constantes, o problema clássico de determinar um ganho de realimentação completa de estado, para o sistema dado em (4), que minimiza o índice de desempenho (6), é conhecido como o problema do regulador linear quadrático ótimo, que é apresentado na próxima seção.

4 REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO ÓTIMO (LQR)

Projetos de controladores ótimos para sistemas LTI usando a técnica do regulador quadrático ótimo podem ser encontrados em (Kwakernaak and Sivan (1972) e Kailath (1979)).

Para um sistema contínuo descrito por (3), o problema LQR tem o objetivo de determinar um controlador de realimentação completa de estado, que minimiza o índice de desempenho (6). Onde Q e R são matrizes de ponderação, tais que, $Q = Q' \geq 0$ e $R = R' > 0$.

O controlador ótimo LQR de realimentação completa de estado que minimiza o custo (6) é dado por

$$u(t) = Kx(t), \quad (8)$$

com $K = -R^{-1}B'P$ onde $P = P' \geq 0$ é solução da seguinte equação algébrica de Ricatti

$$A'P + PA - PBR^{-1}B'P + Q = 0.$$

5 PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO UTILIZADOS

Tradicionalmente, a otimização do projeto de uma planta, e do seu controlador obedece uma estratégia sequencial em que primeiramente a planta é otimizada e em seguida o controlador. Embora esta estratégia sequencial tem sido utilizada com sucesso na maioria dos trabalhos presentes na literatura, ela pode não fornecer a solução ótima como nos problemas onde os parâmetros da planta e do controlador são otimizados simultaneamente.

O problema de otimização proposto neste trabalho é definido como:

$$\begin{aligned} \min_{m_1, m_2, c, k_1, k_2, K} J \\ \text{sujeito a} \quad \dot{x} = Ax(t) + Bu(t), \end{aligned} \quad (9)$$

onde as matrizes A e B são definidas em (4) e a lei de controle $u(t)$ é definida em (8).

De acordo com (Reyer, 2000) existem várias técnicas para o projeto de otimização do controlador e da planta. As técnicas já pesquisadas foram classificadas dentro de quatro estratégias principais: sequencial, iterativa, simultânea e bi-level (não tratada neste trabalho).

5.1 Estratégia simultânea

A estratégia simultânea é utilizada quando deseja-se otimizar simultaneamente os parâmetros da planta e do controlador, ou seja, tem-se o problema de otimização (9).

Neste trabalho, o custo mínimo obtido pela estratégia simultânea é denominado de J_{sim} .

5.2 Estratégia sequencial

A estratégia sequencial resolve o problema em dois passos. Primeiramente é feita a otimização dos parâmetros da planta. Posteriormente, para a planta otimizada, projeta-se o controlador.

Considerando o sistema em malha aberta, ou seja, $K = 0$, tem-se o problema de otimização:

$$\begin{aligned} \min_{m_1, m_2, c, k_1, k_2} J \\ \text{sujeito a} \quad \dot{x} = Ax(t), \end{aligned}$$

onde a matriz A é definida em (4).

Para os parâmetros ótimos da planta, é projetado o controlador LQR. Neste trabalho, o custo obtido otimizando os parâmetros da planta, m_1 , m_2 , c , k_1 , k_2 e $K = 0$, ou seja, com o sistema em malha aberta e o custo mínimo obtido pela estratégia sequencial com o sistema em malha fechada, são denominados respectivamente por J_{seq} e $J_{seq-lqr}$.

5.3 Estratégia iterativa

As estratégias iterativas propõem que dada uma planta inicial ou um controlador inicial, busca-se melhorar o projeto inicial da planta sem comprometer o desempenho do controlador ou melhorar o projeto do controlador sem comprometer o desempenho da planta.

Algoritmo:

1. Considerando o sistema em malha aberta, ou seja, $K = 0$, tem-se o problema de otimização:

$$\min_{m_1, m_2, c, k_1, k_2} J$$

$$\text{sujeito a } \dot{x} = Ax(t),$$

onde a matriz A é definida em (4).

2. Para os parâmetros ótimos da planta, m_1, m_2, c, k_1, k_2 , é projetado o controlador LQR, K .
3. Usando K obtido no passo anterior, tem-se o problema de otimização:

$$\min_{m_1, m_2, c, k_1, k_2} J$$

$$\text{sujeito a } \dot{x} = Ax(t) + Bu(t),$$

onde as matrizes A e B são definidas em (4) e a lei de controle $u(t)$ é definida em (8).

4. Voltar ao passo 2.

O algoritmo da estratégia iterativa ocorre até o momento em que o menor custo é obtido. Neste trabalho, o custo mínimo obtido pela estratégia iterativa é denominado de J_{ite} .

Para que os processos de otimização ocorram é necessária a utilização de uma função de otimização. A função de otimização usada para resolver os problemas de otimização presentes neste trabalho é apresentada na próxima seção.

6 UTILIZAÇÃO DO MATLAB

Nos problemas de otimização, a função de otimização usada foi a *fmincon*. Esta função é usada em casos de otimização não linear restrita, que tem o objetivo de calcular um valor mínimo de uma função escalar de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial.

A função *fmincon* suporta duas classes de problemas: problemas de grande porte e de médio porte. Para essas classes de problemas, diferentes métodos de otimização podem ser utilizados.

O problema tratado neste trabalho é um problema de médio porte. Para este tipo de problema pode ser usado o método de programação quadrática sequencial. Neste método, a função resolve em cada iteração um subproblema de programação quadrática utilizando *active set algorithm*. O outro algoritmo que pode ser usado é o algoritmo dos pontos interiores (*interior point algorithm*). Uma estimativa da Hessiana da Lagrangeana é atualizada a cada iteração utilizando a fórmula BFGS (método de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Além deste método, a aproximação à Hessiana da Lagrangeana (ou a sua inversa) pode ser encontrada através do uso da informação das condições de otimalidade de primeira ordem pela versão Quasi-Newton.

Neste trabalho foi utilizado o *default* da função *fmincon*, ou seja, foi usado o método de programação quadrática sequencial e a aproximação da Hessiana foi feita pelo método Quasi-Newton.

6.1 Algoritmos Genéticos

Algoritmos genéticos também foram utilizados para resolver o problema de otimização simultânea. Os algoritmos genéticos (Holland (1975); Goldberg (1989) e Man *et al.* (1996)) são um caso particular da programação evolutiva que usam técnicas inspiradas na evolução biológica para resolver os problemas de otimização. Eles são caracterizados como uma busca global heurística, que propõem procurar pontos no espaço amostral de maneira inteligente, sem muitas informações sobre a função objetivo. Isso resulta numa alta flexibilidade do algoritmo para trabalhar com diversos problemas. No entanto, essa flexibilidade leva a um custo computacional elevado. O custo mínimo obtido usando-se o algoritmo genético é denominado J_{sim-ag} .

7 RESULTADOS NUMÉRICOS

Para ilustrar os problemas de otimização dos parâmetros da planta e do controlador do sistema (4), as simulações numéricas foram feitas utilizando o MATLAB, com os dados numéricos da suspensão retirados de (Thompson, 1976)

Os valores nominais utilizados para os parâmetros da planta foram:

$$m_1 = 28.58kg; \quad m_2 = 288.9kg; \quad c = 1300Ns/m; \quad k_1 = 155900N/m \quad e \quad k_2 = 19960N/m. \quad (10)$$

As condições iniciais são dadas em (5).

As matrizes de ponderação Q e R , são definidas em (7), sendo $q_1 = 10$, $q_2 = 1$ e $q_3 = 0.8 \cdot 10^{-9}$.

7.1 Valor do custo para os parâmetros nominais da planta

Também foram calculados os custos do sistema em malha aberta e em malha fechada usando os parâmetros nominais dados acima.

Implementação: Seja o sistema (4), com os valores nominais definidos em (10), logo tem-se matrizes A_{pn} e B_{pn} constantes, Seja a lei de controle definido em (8):

1. Considerando o sistema sem ação de controle, ou seja, $K = 0$, tem-se o sistema

$$\dot{x}(t) = A_{pn}x(t);$$

2. Dada uma condição inicial x_0 , a solução $x(t)$ do sistema apresentado no passo 1 pode ser obtida utilizando-se o comando *initial* do MATLAB.
3. Usando a solução $x(t)$, encontrada no passo 2, calcula-se o custo (6), para o sistema em malha aberta, que neste trabalho é denominado de J_{nom} ;
4. Com as matrizes A_{pn} e B_{pn} constantes e considerando a lei de controle (8), obtém-se o sistema em malha fechada

$$\dot{x}(t) = (A_{pn} + B_{pn}K)x(t);$$

5. Usando a técnica LQR no sistema obtido no passo 4, obtém-se o ganho ótimo K de realimentação completa de estados que minimiza o custo. Este custo mínimo é denominado de $J_{nom-lqr}$.

7.2 Resultados

As Fig. 2 e 3 mostram as respostas ao degrau unitário da suspensão veicular descrita na Eq. (4) para o sistema com os parâmetros nominais da planta em malha aberta, para o sistema com os parâmetros nominais da planta em malha fechada, para o sistema cujos parâmetros da planta e do controlador sofreram otimização sequencial e para o sistema em que os parâmetros da planta e do controlador foram otimizados simultaneamente. A Fig. 2 mostra a resposta ao degrau unitário de $x_1(t)$ versus o tempo. E a Fig. 3 mostra a resposta ao degrau unitário de $x_2(t)$ versus o tempo. Sendo $x_1(t)$ e $x_2(t)$ definidos em (2).

Na Fig. 2, nota-se o maior overshoot para o sistema com os parâmetros nominais da planta em malha aberta, ou seja, para estes valores, a roda sofre grandes movimentos (pouca dirigibilidade). O sistema que apresenta a melhor dirigibilidade é o sistema que sofreu a otimização sequencial.

Para a resposta $x_2(t)$ presente na Fig.3, nota-se novamente que o sistema em malha aberta apresenta o maior overshoot. O sistema que apresenta o menor overshoot é o sistema cujos parâmetros da planta e do controlador foram otimizados simultaneamente.

As Fig. 4 e 5 mostram as respostas ao degrau unitário da suspensão para o sistema com os parâmetros nominais da planta em malha aberta, para o sistema cujos parâmetros da planta foram otimizados em malha aberta, para o sistema cujos parâmetros da planta e do controlador foram otimizados iterativamente e para o sistema cujos parâmetros da planta e do controlador foram otimizados simultaneamente. A Fig. 4 mostra a resposta ao degrau unitário de $x_1(t)$ versus o tempo. E a Fig. 5 mostra a resposta ao degrau unitário de $x_2(t)$ versus o tempo.

Na Fig. 4 percebe-se um maior overshoot para o sistema com os parâmetros nominais em malha aberta. Seguindo do sistema cujos parâmetros da planta e do controlador foram otimizados simultaneamente. O sistema cujos parâmetros da planta e do controlador foram otimizados iterativamente e o sistema cujos parâmetros foram otimizados em malha aberta possuem valores de pico bem próximos, ou seja, estes sistemas apresentam melhor dirigibilidade.

Na Fig. 5 o sistema com os parâmetros nominais em malha aberta possui o maior overshoot. Seguindo do sistema cujo os parâmetros da planta foram otimizados em malha aberta e do sistema cujos parâmetros da planta e do controlador foram otimizados iterativamente. O sistema que apresenta o menor overshoot é o sistema cujos parâmetros da planta e do controlador foram otimizados simultaneamente.

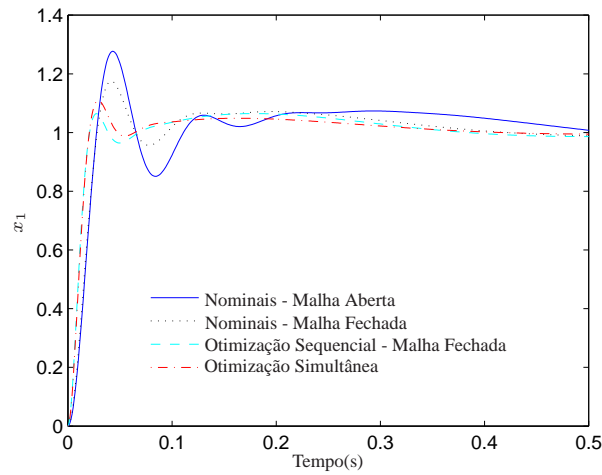


Figura 2. Curvas $x_1(t)$ de resposta ao degrau unitário.

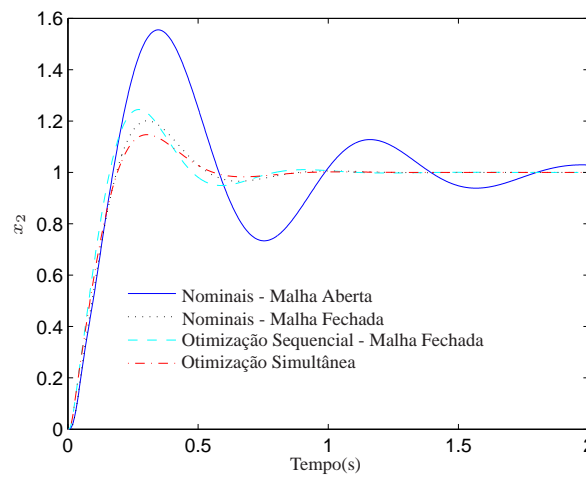


Figura 3. Curvas $x_2(t)$ de resposta ao degrau unitário.

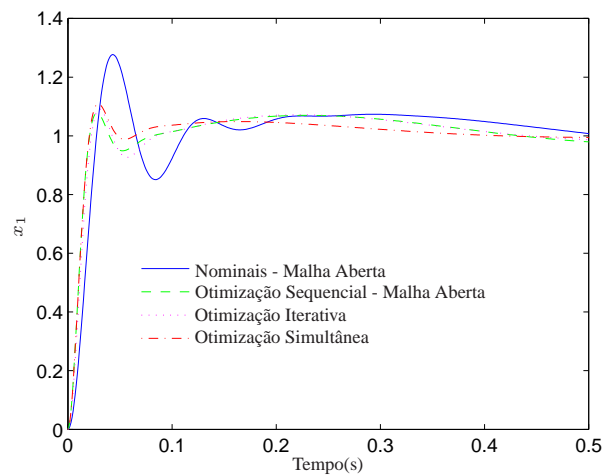


Figura 4. Curvas $x_1(t)$ de resposta ao degrau unitário.

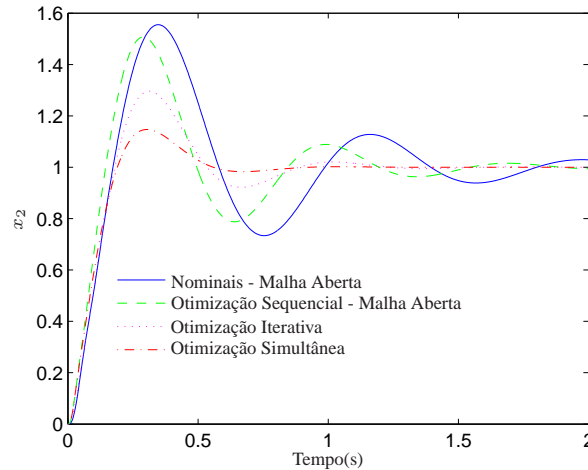


Figura 5. Curvas $x_2(t)$ de resposta ao degrau unitário.

Tabela 1. Valores dos custos obtidos.

Exemplos estudados	J
Parâmetros Nominais - Malha Aberta	0.2806
Parâmetros Nominais - Malha Fechada	0.2136
Otimização Sequencial - Malha aberta	0.1777
Otimização Sequencial - Malha fechada	0.1490
Otimização Iterativa	0.1751
Otimização Simultânea	0.1582
Otimização Simultânea - Algoritmo Genético	0.1510

Os valores dos custos obtidos são apresentados na tabela abaixo.

A Tab. 1 apresenta os valores dos custos obtidos para cada processo de otimização realizado.

Para o sistema com os parâmetros nominais da planta em malha aberta foi obtido um custo de $J_{nom} = 0.2806$. E para o sistema com os parâmetros nominais da planta em malha fechada foi obtido um melhor resultado para o custo, $J_{nom-lqr} = 0.2136$.

Com a otimização sequencial, foram calculados os custos $J_{seq} = 0.1777$ e $J_{seq-lqr} = 0.1490$. Nota-se que, os valores obtidos para estes custos são menores que os valores dos custos obtidos usando os parâmetros nominais para a planta.

Foi feita a otimização iterativa e simultânea dos parâmetros da planta e do controlador e os custos obtidos foram, respectivamente, $J_{ite} = 0.1751$ e $J_{sim} = 0.1582$.

Para comparação, foi utilizado um toolbox de algoritmo genético para resolver o problema da otimização simultânea e o custo obtido foi $J_{sim-ag} = 0.1510$.

Percebe-se que, diferente do esperando o valor do custo após a otimização simultânea é maior que o custo após a otimização sequencial.

Os tempos computacionais são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2. Tempos computacionais dos processos de otimização.

Processos de otimização estudados	$tempo(s)$
Otimização Sequencial	7.6
Otimização Iterativa	5.3
Otimização Simultânea	11.1
Otimização Simultânea - Algoritmo Genético	542.4

A Tab. 2 apresenta os tempos computacionais dos processos de otimização sequencial e simultânea.

Nota-se que o tempo computacional do processo de otimização sequencial é menor que o tempo computacional para

o processo de otimização simultânea. E que o tempo computacional do processo de otimização simultânea utilizando algoritmo genético é significativamente maior do que o tempo computacional do processo de otimização simultânea usando a função *fmincon*. Porém, isto já era esperado, pois, o algoritmo genético apresenta alta flexibilidade para trabalhar com diversos problemas, contudo essa flexibilidade é compensada por um custo computacional muito elevado.

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho, os parâmetros da planta e do controlador de um modelo quarter-car de uma suspensão veicular foram otimizados, com o objetivo de encontrar a combinação que atingisse o melhor desempenho.

Primeiramente foi feita a otimização sequencial. Em seguida, foram feitas as otimizações iterativa e simultânea. Era esperado que a otimização simultânea apresentasse o melhor resultado, porém, o melhor resultado ocorreu quando foi feita a otimização sequencial. Com isso, comprova-se a complexidade do problema de otimização simultânea e conclui-se que as ferramentas do MATLAB utilizadas, limitaram a resolução desse problema.

Verificou-se que a otimização simultânea realizada pelo algoritmo genético apresentou melhor resultado que o processo de otimização simultânea utilizando a função *fmincon* do MATLAB, porém, o tempo computacional foi maior.

Nota-se que o projeto simultâneo da estrutura e do controlador na prática são computacionalmente desafiadores, portanto, é necessário algoritmos mais eficientes.

9 AGRADECIMENTOS

Os autores são parcialmente financiados pela CAPES.

10 REFERÊNCIAS

- Belvin, W.K. and Park, K.C., 1990. "Structural tailoring and feedback control synthesis: An interdisciplinary approach". Vol. 13, No. 3, pp. 424–429.
- Camino, J.F., de Oliveira, M.C. and Skelton, R.E., 2003. "Convexifying linear matrix inequality methods for integrating structure and control design". Vol. 129, pp. 978–988.
- Elmadany, M.M. and Abduljabbar, Z.S., 1999. "Linear quadratic gaussian control of a quarter-car suspension". Vol. 32, No. 6, pp. 479–497.
- Fathy, H.K., Papalambros, P.Y., Ulsoy, A.G. and Hrovat, D., 2003. "Nested plant/controller optimization with application to combined passive/active automotive suspensions". Denver, Colorado, USA, pp. 3375–3380.
- Fathy, H.K., Reyer, J.A., Papalambros, P.Y. and Ulsoy, A.G., 2001. "On the coupling between the plant and controller optimization problems". Arlington, Virginia, USA, pp. 1864–1869.
- Goldberg, D.E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston, MA, USA.
- Grandhi, R.V., 1989. "Structural and control optimization of space structures". Vol. 31, No. 2, pp. 139–150.
- Holland, J.H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems - An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. Michigan, USA.
- Jin, I.M. and Sepulveda, A.E., 1995. "Structural/control system optimization with variable actuator masses". Vol. 33, No. 9, pp. 1709–1714.
- Kailath, T., 1979. *Linear Systems*. USA.
- Kwakernaak, H. and Sivan, R., 1972. *Linear Optimal Control Systems*. New York, USA.
- Man, K.F., Tang, K.S. and Kwong, S., 1996. "Genetic algorithms: Concepts and applications". Vol. 43, No. 5, pp. 519–534.
- Onoda, J. and Haftka, R.T., 1987. "An approach to structure/control simultaneous optimization for large flexible spacecraft". Vol. 25, No. 8, pp. 1133–1139.
- Rao, S.S., 1988. "Combined structural and control optimization of flexible structures". Vol. 13, No. 1, pp. 1–16.
- Reyer, J.A., 2000. *Combined Embodiment Design and Control Optimization: Effect of Cross-Disciplinary Coupling*. Ph.D. thesis, The University of Michigan, Michigan, USA.
- Smith, M.J., Grigoriadis, K.M. and Skelton, R.E., 1992. "Optimal mix of passive and active control in structures". Vol. 15, No. 4, pp. 912–919.
- Thompson, A.G., 1971. "Design of active suspensions". pp. 553–563.
- Thompson, A.G., 1976. "An active suspension with optimal linear state feedback". Vol. 5, No. 4, pp. 187–203.
- Yang, Y.P. and Chen, Y.A., 1996. "Multiobjective optimization of hard disk suspension assemblies. integrated structure and control design". Vol. 59, No. 4, pp. 771–782.

11 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE PLANT AND CONTROLLER FOR AN ACTIVE VEHICLE SUSPENSION

Ana L. Soubhia, analuisasoubhia@gmail.com¹

Gustavo Jeuken, gjeuken@gmail.com¹

Juan F. Camino, camino@fem.unicamp.br¹

¹Mechanical Engineering Faculty, University of Campinas - UNICAMP

Abstract. *This paper proposes the application of techniques for solving design problems of simultaneous optimization of the parameters of the plant and controller for an active vehicle suspension, so that the system achieves the best performance. Three different optimization strategies that solve this problem are compared: sequential strategy, iterative strategy and simultaneous strategy. The work unfolds as follows: First, the structure is modeled. Second, the structural optimization procedure is applied. Then a controller is designed using the structure optimized. Then, we propose the methodology for simultaneous optimization of the parameters of the plant and controller. Numerical examples illustrate the proposed optimization problems.*

Keywords: *Structural Optimization, Controller Design, LQR, Simultaneous Optimization.*