

OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DE UM DISPOSITIVO ROBÓTICO ATUADO POR CABOS PARA REABILITAÇÃO DO MEMBRO INFERIOR HUMANO USANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

R. S. Gonçalves, FEMEC-Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, rsgoncalves@mecanica.ufu.br
A. M. Barbosa, FEMEC-Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, andremarkez@yahoo.com.br
F. S. Lobato, FEQUI-Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, fslobato@feq.ufu.br

Resumo. No projeto de sistemas de engenharia é comum considerar que os modelos, as variáveis e os parâmetros são confiáveis, isto é, não apresentam erros de modelagem e de estimação. Entretanto, os sistemas a serem otimizados podem ser sensíveis a pequenas alterações nas variáveis de projeto causando significativas modificações no vetor de objetivos. Neste contexto, a presente contribuição tem por objetivo propor uma metodologia para a minimização das forças aplicadas em cabos utilizados para a reabilitação do membro inferior humano através da determinação do posicionamento de motores usando o Algoritmo de Evolução Diferencial associado ao conceito de Média Efetiva para a inserção de robustez. Os resultados obtidos demonstram que a metodologia proposta configura-se como uma estratégia interessante para o tratamento de problemas de otimização robustos.

Palavras chave: Otimização Robusta, Evolução Diferencial, Média Efetiva, Reabilitação, Dispositivo Robótico.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente durante o projeto de sistemas de engenharia considera-se que o resultado obtido não está sujeito à influência de perturbações das variáveis de projeto e/ou dos parâmetros envolvidos no processo. Todavia, a solução ótima global pode ser sensível a pequenas perturbações do vetor de variáveis de projeto. Neste caso, uma solução ótima local pode ser menos sensível a pequenas perturbações do vetor de variáveis, o que do ponto de vista prático, representa uma solução factível e que pode ser implementada na indústria, já que esta é pouco sensível ao vetor de variáveis.

No contexto atual do projeto de sistemas de engenharia há de se considerar que os modelos, as variáveis e os parâmetros podem não ser plenamente confiáveis, isto é, apresentam erros de modelagem e de estimação. Neste caso, os sistemas a serem otimizados podem ser sensíveis a pequenas alterações nas variáveis de projeto ocasionando modificações no vetor de objetivos (solução não robusta). A otimização robusta é definida como uma abordagem que produz uma solução pouco sensível a pequenas alterações nas variáveis de projeto (Taguchi, 1984). Ressalta-se que uma solução robusta pode não coincidir com a solução nominal, isto é, com a solução onde não se considera a robustez. Assim, todo problema de otimização pode ser considerado sob o enfoque da robustez.

Neste cenário, o projeto de sistemas robóticos para fins de simplificação das tarefas configura-se como um bom exemplo onde se pode aplicar o conceito de robustez. Isto se deve ao fato de que o projeto de tais sistemas deve ser concebido com grande confiabilidade, já que a manufatura destes dispositivos robóticos influenciará significadamente a execução da tarefa. Neste caso, observam-se aplicações nas áreas da saúde, em cirurgias, em próteses e em estruturas que auxiliam os processos de reabilitação. No caso específico do processo de reabilitação, o projeto robusto destes dispositivos é de suma importância para aumentar a eficiência da sua aplicabilidade.

Diante do que foi exposto, o presente trabalho tem por objetivo aplicar o conceito de robustez associado ao algoritmo de Evolução Diferencial (ED) para a minimização dos cabos que não estão tensionados em um dispositivo robótico utilizado para a reabilitação do membro inferior humano via determinação do posicionamento de motores. Este trabalho está estruturado como segue: a seção 2 apresenta o conceito de média efetiva, empregada para avaliar a robustez; já nas seções 3 e 4 são apresentados a descrição do problema de interesse bem como a concepção conceitual da ED; na seção 5 são apresentados os resultados. Finalmente, as conclusões e perspectivas são comentadas na última seção.

2. OTIMIZAÇÃO ROBUSTA

Média Efetiva (Deb e Gupta, 2006) - Uma solução x^* é denominada solução robusta se a solução ótima é viável para o seguinte problema de otimização mono-objetivo definido em relação à vizinhança δ de uma solução x :

$$\min \frac{1}{|Y_\delta(x)|} \int_{y \in Y_\delta(x)} f dy \quad (1)$$

na qual $|Y_\delta|$ é o hipervolume da vizinhança e f é a função objetivo. Um conjunto finito de H soluções deve ser gerado “aleatoriamente” usando, por exemplo, o Hipercubo Latino para a avaliação da integral dada pela Eq. (1). Neste caso,

definindo-se a vizinhança δ em relação ao vetor de variáveis de projeto, N soluções x são geradas empregando-se o Hipercubo Latino, sendo a integral avaliada numericamente. Salienta-se que isto onera em muito o custo computacional do processo, já que são necessárias, a cada geração, N avaliações adicionais da função objetivo (Deb e Gupta, 2006).

Na literatura podem ser encontrados estudos que fazem uso do conceito de robustez no contexto mono e multi-objetivo (Deb e Gupta, 2006). A grande maioria destes estudos requer a introdução de novas restrições e/ou novos objetivos, como no caso das funções de vulnerabilidade (relação entre a média e o desvio padrão do vetor de funções objetivo) e de funções de distribuições de probabilidade para as variáveis de projeto e/ou objetivos. Como alternativa a estas formulações clássicas, Deb e Gupta (2006) estenderam o conceito de Média Efetiva, originalmente utilizada para problemas mono-objetivos, para o contexto multiobjetivo. Nesta abordagem, nenhuma restrição adicional é inserida no problema original. Desta forma, o problema é reescrito como uma “média” do vetor de objetivos originais.

3. O PROBLEMA FÍSICO DE INTERESSE

Nas últimas décadas, o uso de dispositivos robóticos para auxiliar não só nas tarefas tradicionais na indústria, mas também no que diz respeito à saúde do homem (física e mental) tem atraído a atenção da comunidade científica ao longo dos anos devido aos inúmeros avanços nesta área. No caso do trabalho dos profissionais da saúde durante as sessões de reabilitação em pacientes vítimas de lesões, oriundas de quedas ou acidentes, acidente vascular cerebral (AVC) ou qualquer outro fator que comprometa a movimentação dos membros inferiores, é uma tarefa que pode demandar esforço físico e muitas vezes necessitar de ajudantes para realizar as sessões, se tornando uma tarefa cansativa e repetitiva.

O dispositivo apresentado na Fig. (1) é uma estrutura robótica paralela atuada por cabos para auxiliar na reabilitação do membro inferior humano.

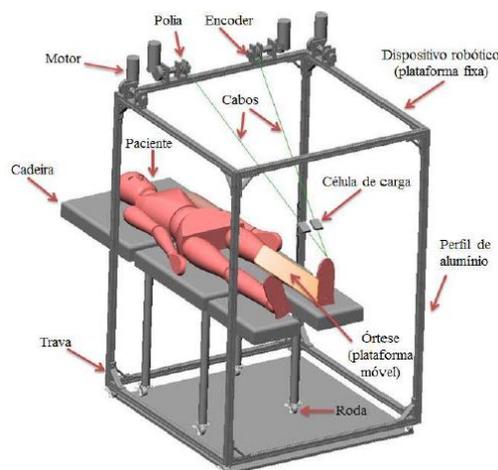


Figura 1. Representação esquemática do dispositivo robótico considerado neste trabalho (Barbosa, 2013).

Durante as sessões de terapia, o membro inferior do paciente será movimentado diversas vezes e em várias posições, combinações e amplitude diferentes. Tais movimentos serão realizados por intermédio dos cabos presentes no dispositivo e ligados ao paciente por meio da órtese(s) colocada no membro inferior. Assim, para determinar se os cabos conseguirão movimentar e suportar o peso do membro inferior durante as sessões de reabilitação é necessário determinar as forças que os mesmos terão que suportar, analisando se esses valores se encontram dentro da faixa suportada pelos cabos. O comprimento dos cabos é outro fator a ser analisado, para garantir que as amplitudes desejadas durante a movimentação com o membro inferior sejam alcançadas.

O modelo geométrico do dispositivo robótico paralelo atuado por cabos foi proposto por Barbosa (2103), fundamentado no desenvolvido por Côté (2003). Este permite determinar, por meio da configuração do elemento terminal (posição e orientação), o comprimento necessário dos cabos para se alcançar a posição desejada. Para garantir o equilíbrio estático durante a realização do movimento do membro inferior (plataforma móvel) do corpo humano, o somatório das forças e momentos existentes nos cabos deve ser igual ao somatório das forças e momentos externos aplicados ao membro inferior. É importante ressaltar que os cabos apenas conseguem puxar, ou seja, produzir forças de tração, mas não conseguem empurrar nenhum objeto, sendo incapazes de realizar forças de compressão por não possuírem estrutura rígida. Neste caso, a função objetivo (FO) consiste em minimizar a quantidade de forças de compressão que podem surgir durante a sequência do movimento do dispositivo robótico, isto é:

$$\min FO = \sum_{i \in I} (\max(0, -(F_i - 0,5)))^2 \quad (2)$$

onde Γ é o conjunto das forças F que em um determinado instante deixam de ser de tração para se tornarem forças de compressão. Intuitivamente, com esta função procura-se minimizar a quantidade de forças menores que 0,5 N, isto é, que deixam de serem forças de tração para se tornarem forças de compressão a partir da determinação da posição ($x_i, i=1, \dots, 6$) dos motores posicionados na Fig. (1).

4. EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

O algoritmo de Evolução Diferencial (ED), proposto por Storn e Price (1995), configura-se como uma das técnicas de otimização mais empregadas nos dias atuais. Isto se deve, entre outros aspectos, pela sua concepção conceitual simples, pela facilidade de implementação e por ser capaz de escapar de ótimos locais (Storn *et al.*, 2005). Neste algoritmo, diferentemente no que acontecia nos primeiros algoritmos genéticos propostos, o valor de cada variável é atualizado pela simples realização de operações vetoriais, sendo o seu procedimento geral regido pelas seguintes etapas (Storn *et al.*, 2005):

- Gera-se uma população inicial com NP soluções factíveis para o problema em questão, onde garante-se por “regras de reparo” que os valores atribuídos às variáveis estão dentro das fronteiras delimitadas pelo projetista;
- Seleciona-se um indivíduo, de forma aleatória, para ser substituído. Três diferentes indivíduos são selecionados como genitores (pais), sendo que um destes é selecionado como genitor principal;
- Modifica-se cada variável do genitor principal com alguma probabilidade de cruzamento CR ;
- Adiciona-se ao valor atual da variável (genitor principal) a diferença entre duas outras variáveis (genitores secundários) ponderada por uma taxa de perturbação F . Este procedimento representa o operador de cruzamento na ED;
- Se o vetor resultante apresenta uma função de aptidão melhor que a escolhida, ele é substituído; caso contrário, tal vetor escolhido para ser eventualmente substituído é mantido na população.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para fins de comparação considera-se a simulação do modelo matemático empregando as coordenadas para os seis motores considerados (Barbosa, 2013): Motor 01 – $[0 \ 0 \ 70 \ (x_1)]$, Motor 02 – $[0 \ 100 \ 70 \ (x_2)]$, Motor 03 – $[40 \ (x_3) \ 0 \ 163,5]$, Motor 04 – $[40 \ (x_4) \ 100 \ 163,5]$, Motor 05 – $[100 \ 25 \ (x_5) \ 163,5]$ e Motor 06 – $[100 \ 75 \ (x_6) \ 163,5]$. Para a aplicação do algoritmo de ED (casos nominal e robusto) foram utilizados os seguintes parâmetros: 25 indivíduos na população; 100 gerações; probabilidade de cruzamento e taxa de perturbação iguais a 0,8, além da estratégia DE/rand/1/bin. O espaço de projeto adotado em todas as aplicações foi definido como (Barbosa, 2013): $50 \leq x_i \leq 150$ cm ($i=1,2$) e $10 \leq x_i \leq 90$ cm ($i=3,4,5,6$). É importante ressaltar que tais restrições foram definidas de modo a proporcionar uma configuração factível em termos do dispositivo robótico já existente no Laboratório de Automação e Robótica da Universidade Federal de Uberlândia. Para o estudo de caso nominal, isto é, sem robustez são necessárias $25+100 \times 50$ avaliações da função objetivo em cada execução. Já para o caso robusto, são necessárias $25+100 \times 50 \times 50$ avaliações da função objetivo. Assim, observa-se que há um grande acréscimo no número de avaliações para o caso robusto, como já era de se esperar. Cada um dos estudos de caso foram simulados dez vezes com o seguinte vetor de sementes iniciais para o gerador de números aleatórios *rand* do *software* Matlab® ($[0 \ 1 \dots \ 9]$).

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos com a simulação do problema (primeira linha) e com a aplicação do algoritmo de ED (sem robustez).

Tabela 1. Resultados obtidos com a otimização nominal.

Semente	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)	x_4 (cm)	x_5 (cm)	x_6 (cm)	FO
-	70,00	70,00	40,00	40,00	25,00	75,00	46,00
0	95,9149	95,9149	10,00	10,00	10,00	9,00	0,6687
1	95,9149	95,9149	10,00	10,00	10,00	9,00	0,6687
2	95,9149	95,9149	10,00	10,00	9,00	10,00	0,6687
3	95,9149	95,9149	10,00	10,00	9,00	10,00	0,6687
4	95,9149	95,9149	10,00	10,00	10,00	9,00	0,6687
5	95,9149	95,9149	10,00	10,00	10,00	9,00	0,6687
6	95,9149	95,9149	10,00	10,00	10,00	9,00	0,6687
7	95,9149	95,9149	10,00	10,00	9,00	10,00	0,6687
8	95,9149	95,9149	10,00	10,00	10,00	9,00	0,6687
9	95,9149	95,9149	10,00	10,00	10,00	9,00	0,6687

Nesta tabela observa-se que o algoritmo de ED foi capaz de encontrar, independentemente da semente, o mesmo valor da FO , bem inferior ao estudo de caso base (simulação), conforme esperado. Na Figura (2) pode-se observar uma variação dos resultados obtidos com a simulação e com o algoritmo de ED, para os valores de comprimento e força nos

cabos. Em relação às forças encontradas, pode-se notar que após a otimização, as forças estão mais distribuídas nos cabos, e que a quantidade de pontos que possuem força negativa diminuiu. Já os comprimentos dos cabos aumentaram após a otimização, o que não significa uma perda de qualidade, sendo esse aumento devido ao reposicionamento dos motores na estrutura.

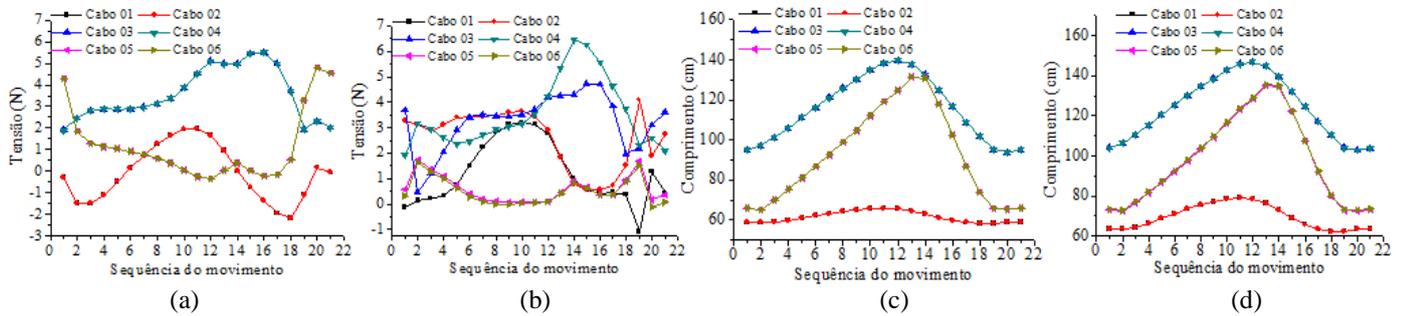


Figura 2. Comparação entre os resultados para as tensões e comprimentos nos cabos usando os dados para simulação e os obtidos pelo algoritmo ED (semente de número zero). (a) Tensão nos cabos (simulação); (b) Tensão nos cabos (ED); (c) Comprimento dos cabos (simulação); (d) Comprimento dos cabos (ED).

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos com o algoritmo de ED considerando robustez com diferentes valores de desvios (δ).

Tabela 2. Resultados obtidos com a otimização robusta.

δ	x_1 (cm)	x_2 (cm)	x_3 (cm)	x_4 (cm)	x_5 (cm)	x_6 (cm)	FO
-	95,9149	95,9149	10,00	10,00	10,00	9,00	0,6687
0,01	95,8999* (0,1748)**	95,9355 (0,1365)	10,00 (0,0036)	10,00 (0,0023)	90,00 (38,6155)	10,00 (38,6318)	0,6737 (0,0003)
0,025	95,4764 (0,4621)	96,5193 (0,5433)	10,00 (0,0279)	10,00 (0,0135)	90,00 (1,2243)	10,1845 (0,7745)	0,6871 (0,0018)
0,05	97,5361 (1,0633)	95,1329 (1,0663)	10,00 (0,0471)	10,00 (0,0560)	90,00 (2,9372)	13,7985 (0,2259)	0,7363 (0,0024)

* Melhor resultado, ** Desvio padrão.

Nesta tabela observa-se que o ótimo obtido considerando robustez é pior do que o obtido via solução nominal. Além disso, o aumento do desvio deteriora mais ainda o valor da solução nominal. A Figura (3) apresenta a comparação entre as tensões e os comprimentos nos cabos obtidos pelo algoritmo ED (nominal e robusto com δ igual a 0,05). Conforme observado anteriormente, observa-se uma variação dos resultados obtidos entre estas duas metodologias. Em relação às tensões pode-se notar que as forças estão um pouco mais distribuídas nos cabos, e que a quantidade de pontos que possuem força negativa são praticamente equivalentes.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou o desenvolvimento de uma estratégia sistemática para a resolução de problemas de otimização robustos através do algoritmo de Evolução Diferencial associado ao conceito de média efetiva. A metodologia proposta foi utilizada para o projeto de um dispositivo robótico empregado para a reabilitação do membro inferior humano através da determinação do posicionamento de motores via minimização das forças nos cabos que não tencionavam. De forma geral observa-se, para os estudos de caso propostos, que a metodologia apresentada configurou-se como uma alternativa interessante para o tratamento de problemas de otimização robustos. Como proposta de trabalho futuros pode-se citar a avaliação da sensibilidade dos parâmetros do algoritmo de otimização, bem como da otimização do espaço de trabalho do dispositivo, da quantidade de motores e a realização de testes experimentais em humanos com o dispositivo proposto.

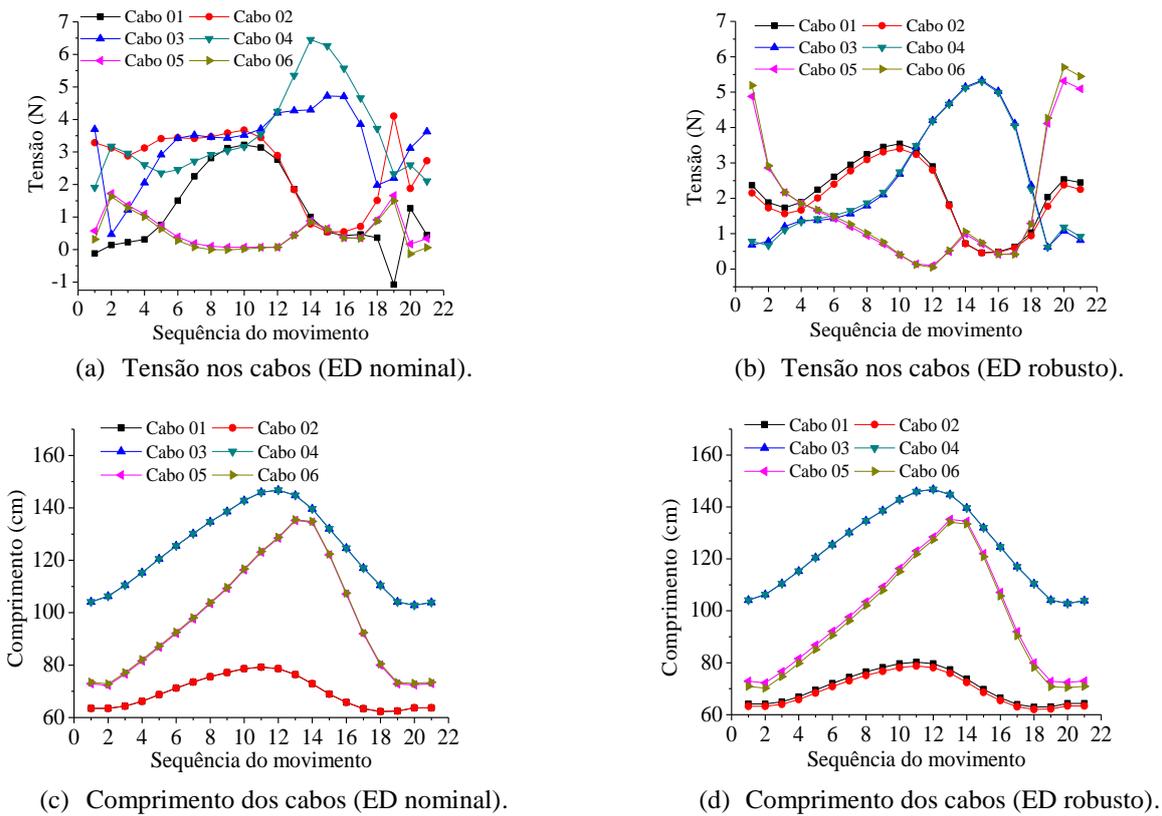


Figura 3. Comparação entre os resultados para as tensões e comprimentos nos cabos obtidos pelo algoritmo ED (nominal e robusto com δ igual a 0,05).

7. REFERÊNCIAS

- Barbosa, A. M. 2013, “Desenvolvimento de um Dispositivo Robótico Atuado por Cabos para Reabilitação do Membro Inferior Humano”, Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.
- Côté, G., 2003. Analyse et Conception de Mécanismes Parallèles Actonnés par Câbles. Dissertação de Mestrado, em Francês.
- Deb, K., Gupta, H. 2006, “Introducing Robustness in Multi-Objective Optimization”, *Evolutionary Computation*, 14, 463-494.
- Storn, R., Price, K. 1995, “Differential Evolution: A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces”. *International Computer Science Institute*, Vol. 12, pp. 1-16.
- Storn, R., Price, K., Lampinen, J. A. 2005, “Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization”. Springer - Natural Computing Series.
- Taguchi, G. 1984, “Quality Engineering through Design Optimization”. Kraus International Publications. New York.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFU, FEMEC, FAPEMIG, CAPES e CNPQ pelo apoio financeiro parcial a este trabalho.

9. ABSTRACT

In the engineering system design is common to consider that the models, variables and parameters are reliable, that is, not present modeling and estimation errors. However, the systems to be optimized can be sensitive to small changes in the design variables causing significant changes in the objective vector. In this context, this contribution aims to propose a methodology to minimize the forces applied in cables used for the rehabilitation of the human lower limb by determining the positioning of motors using the Differential Evolution algorithm associated with the concept of Effective Medium for insertion robustness. The results show that the proposed methodology appears as an interesting strategy for the treatment of robust optimization problems.