

08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FLOWER POLLINIZATION APLICADO AO CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE ROTORES FLEXÍVEIS

Edson Hideki Koroishi<sup>1</sup> – [edsonh@utfpr.edu.br](mailto:edsonh@utfpr.edu.br)

Fran Sérgio Lobato<sup>2</sup> – [fslobato@ufu.br](mailto:fslobato@ufu.br)

Aldemir Ap. Cavalini Jr.<sup>3</sup> – [aacjunior@ufu.br](mailto:aacjunior@ufu.br)

Valder Steffen Jr.<sup>4</sup> – [vsteffen@ufu.br](mailto:vsteffen@ufu.br)

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Cornélio Procópio, Av Alberto Carazzai 1640, Cornélio Procópio, MG, Brasil

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica, Bloco 1K, Uberlândia, MG, Brasil

<sup>3,4</sup>Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2121 - Campus Santa Mônica, Bloco 1K, Uberlândia, MG, Brasil

**Resumo.** Em engenharia mecânica, o controle ativo de vibrações aplicado a máquinas rotativas configura um campo ainda com grande potencial de desenvolvimento. Em geral, este tipo de controle necessita de atuadores para aplicação da força de controle sobre a estrutura. Para essa finalidade, no presente trabalho foram empregados atuadores eletromagnéticos, os quais se destacam pela aplicação de forças sem a necessidade de contato mecânico, mas que implicam em elevado consumo energético. Neste cenário, ao mesmo tempo em que se deseja minimizar a vibração também objetiva-se minimizar o consumo energético, configurando-se, assim, um problema de otimização multi-objetivo. Para resolver esse problema multi-objetivo considera-se a aplicação de uma nova estratégia de otimização, a saber, o Multi-Objective Optimization Flower Pollinization Algorithm. Em linhas gerais, este consiste na extensão do Flower Pollinization Algorithm via incorporação de dois operadores, a saber, o de dominância de Pareto e o da Distância da Multidão. Os resultados obtidos com a determinação dos parâmetros ótimos do controlador demonstram o caráter conflitante entre os dois objetivos considerados.

**Palavras-Chave:** Otimização Multi-Objetivo, Flower Pollinization Algorithm, Controle Ativo de Vibrações, Máquinas Rotativas.

### 1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a busca pela redução dos níveis de vibração no conjunto rotor-eixo-mancal configura uma área de pesquisa de grande aplicação acadêmica e industrial. Para estes sistemas, sabe-se que a vibração excessiva pode ocasionar dificuldades operacionais, perda de precisão e

até a falha do sistema (Das *et al.*, 2011). Dentre os métodos utilizados para atenuar vibrações, destaca-se o denominado Controle Ativo de Vibrações (AVC - *Active Vibration Control*), que consiste em um sistema de controle projetado para obter informações do conjunto rotor-mancal e aplicar as ações corretivas necessárias (Abduljabbar *et al.*, 1996). Segundo Saldarriaga (2007), as técnicas de controle ativo de vibrações em máquinas rotativas podem ser apresentadas em duas categorias. A primeira consiste em aplicar forças laterais para contrapor as forças causadas pela vibração e, a segunda, consiste em redistribuir a massa ao longo do eixo com a ajuda de atuadores, de maneira a balancear o rotor.

Koroishi *et al.* (2014) aplicaram o controle ativo de vibrações em um rotor flexível, no qual foram utilizados atuadores eletromagnéticos para aplicação da força de controle sobre o rotor. Os controladores foram projetados utilizando um regulador linear quadrático e uma arquitetura de Lógica *Fuzzy*, comparando ambos os controladores. Fernandes *et al.* (2014) realizaram um estudo visando analisar a relação que existe entre o consumo de energia e minimização da resposta do sistema, na qual eles utilizaram otimização para minimização da função de compromisso entre consumo energético e atenuação de resposta.

O problema apresentado é multi-objetivo, pois deseja-se minimizar duas características de funcionamento do sistema, a saber, o nível de vibração e o consumo energético. A resolução deste problema, diferentemente do que acontece com o problema com um único objetivo, é baseada na extensão do conceito de ótimo para um problema mono-objetivo. A ideia base deste conceito foi proposta inicialmente por Edgeworth (1881), sendo generalizada mais tarde por Pareto (1896). O ótimo de Edgeworth-Pareto, ou simplesmente ótimo de Pareto, como é mais conhecido, é baseado na convicção intuitiva de que um ponto  $x$  é tomado como ótimo se nenhum critério utilizado pode melhorar a solução sem piorar pelo menos um dos outros critérios.

Nas últimas décadas, para superar as desvantagens dos tradicionais métodos utilizados para a agregação dos objetivos, algoritmos baseados em população e que são associados ao conceito de dominância de Pareto têm sido propostos para a resolução dos problemas multi-objetivo. Dentre estes algoritmos destaca-se o *Flower Pollinization Algorithm* (FPA). Este algoritmo, proposto por Yang (2012) para resolver problemas de otimização com um único objetivo, é inspirado no processo de polinização de flores por meio de insetos em que o seu movimento é definido pela distribuição de Lévy (Pavlyukevich, 2007).

Diante do que foi apresentado, a presente contribuição tem por objetivo determinar os parâmetros de um controlador para fins da minimização do consumo de energia e da minimização da amplitude de vibração de um rotor flexível considerando uma nova estratégia de otimização multi-objetivo, a saber, o *Multi-objective Optimization Flower Pollinization Algorithm* (MOFPA). Este trabalho está estruturado como segue. Na seção 2 é apresentada uma breve descrição da modelagem matemática do problema de interesse. Já nas seções 3 e 4 são apresentadas uma revisão envolvendo conceitos de otimização multi-objetivo do *Flower Pollinization Algorithm* (FPA) e de sua extensão para o contexto multi-objetivo, respectivamente. A metodologia é apresentada na seção 4. Já na seção 5 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta. Na última seção são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE INTERESSE

Matematicamente, um rotor flexível pode ser modelado por um conjunto de equações diferenciais (Lalanne, 1998), como descrito pela Eq. (1), em sua forma matricial.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + \left[ [C_b] + \phi [C_g] \right] \{\dot{x}(t)\} + \left[ [K] + \phi [K_g] \right] \{x(t)\} = \{F_u(t)\} + \{F_{EMA}(t)\} \quad (1)$$

na qual  $\{x(t)\}$  é o vetor de deslocamento generalizado.  $[M]$ ,  $[C_b]$ ,  $[C_g]$ ,  $[K]$  e  $[K_g]$  são as conhecidas matrizes de inércia, rigidez, amortecimento viscoso do mancal (que pode incluir amortecimento proporcional), giroscópica (com respeito a velocidade de rotação) e os efeitos da variação da velocidade de rotação.  $\dot{\varphi}$  é a velocidade angular que varia no tempo,  $\{F_u(t)\}$  e  $\{F_{AEM}(t)\}$  são as forças devidas ao desbalanceamento e ao atuador eletromagnético, respectivamente.

A Figura 1 apresenta o modelo discretizado do rotor analisado.

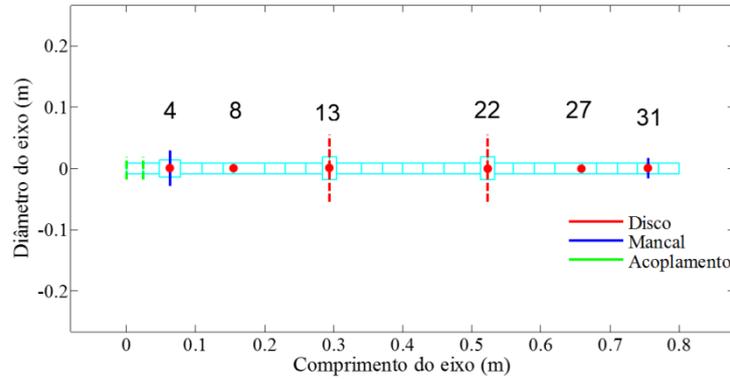


Figura 1 – Modelo discretizado do rotor flexível.

Os nós 13 e 22 correspondem à posição dos discos, os nós 8 e 27 aos sensores e os nós 4 e 31 aos mancais, sendo que o mancal do nó 4 corresponde à posição dos atuadores eletromagnéticos, constituindo o mancal híbrido (rolamento de esferas + atuadores), enquanto que o mancal localizado no nó 31 é um mancal de rolamento (Koroishi *et al.* 2013). A representação do sistema físico com dois graus de liberdade no espaço dos estados é dada pela Eq. (2).

$$\begin{aligned} \{\dot{x}(t)\} &= [A]\{x(t)\} + [B_w]\{w(t)\} + [B_u]\{F_u(t)\} \\ \{y(t)\} &= [C]\{x(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

em que  $[A]$  é a matriz de estado,  $[B_u]$  a matriz de entrada da força de controle,  $[B_w]$  a matriz de entrada da força de excitação,  $[C]$  a matriz de saída,  $x(t)$  o vetor de estados de ordem  $2n \times 1$ ,  $y(t)$  o vetor de saída de ordem  $n_s \times 1$ ,  $u(t)$  o vetor da força de controle de ordem  $n_u \times 1$ ,  $\{w(t)\}$  o vetor da força de excitação de ordem  $n_w \times 1$  e  $\{F_u(t)\}$  o vetor da força de excitação de ordem  $n_u \times 1$ . No qual  $n$  é o número de graus de liberdade,  $n_s$  o número de saídas,  $n_u$  o número de entradas da força de controle e  $n_w$  o número de entradas da força de excitação.

Os vetores e matrizes referentes a Eq. (2) são dadas pelas Eqs. (3) a (7).

$$\{x(t)\}_{2n \times 1} = \begin{Bmatrix} \{d(t)\}_{2n \times 1} \\ \{\dot{d}(t)\}_{2n \times 1} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$[A]_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [I]_{n \times n} \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C_a] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[B_u]_{2n \times n_u} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [P_u]_{n \times n_u} \\ [M]^{-1}_{n \times n} & [P_u]_{n \times n_u} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[B_w]_{2n \times nw} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [P_w]_{n \times nw} \\ [M]^{-1}_{n \times n} & [P_w]_{n \times nw} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[C]_{ns \times n} = [[P_s]_{ns \times n} [I]_{n \times n} \quad [P_s]_{ns \times n} [0]_{n \times n}] \quad (7)$$

em que  $[P_u]$  é a matriz de posicionamento da força de controle,  $[P_w]$  é a matriz de posicionamento da força de excitação e  $[P_s]$  é a matriz de posicionamento da saída.

### 3. OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO

Matematicamente, o problema de otimização multi-objetivo é formulado como aquele onde deve-se minimizar (e/ou maximizar) um vetor de funções objetivo  $f(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}) \ f_2(\mathbf{x}) \ \dots \ f_m(\mathbf{x})]$ , sujeito a um vetor de variáveis de projeto  $\mathbf{x} = [x_1; \ x_2 \ \dots \ x_n]$ , em que  $m$  é o número de objetivos, e  $n$  é o número de parâmetros. Diferentemente do problema mono-objetivo, em que a definição da solução ótima é conhecida, para o problema multi-objetivo não existe uma definição de ótimo para este tipo de problema. Assim, a literatura adota como critério de ótimo para um problema multi-objetivo o conceito de dominância de Pareto (Pareto, 1896). De acordo com esse conceito, problemas multi-objetivos têm um conjunto de pontos de “compromisso”, onde um ponto pode ser melhor com relação a um objetivo  $f_1$  mas pior em relação ao objetivo  $f_2$  e vice-versa. Neste caso, o conjunto de pontos ditos não dominados são solução do problema multi-objetivo, ou seja, formam a chamada Curva de Pareto.

A grande maioria dos métodos de otimização multi-objetivos propostos nos últimos anos apresenta como fundamentação conceitual o uso do critério de dominância de Pareto associado aos algoritmos bio-inspirados na natureza, ou seja, estratégias que procuram imitar o comportamento de seres encontrados na natureza para o desenvolvimento de métodos de otimização. Em linhas gerais, isto se deve a dois pontos: *i*) ao aumento da popularidade dos algoritmos bio-inspirados devido a sua concepção simples, por serem de fácil uso e de fácil implementação; e *ii*) a capacidade destes algoritmos de obter a Curva de Pareto em uma única execução, diferentemente dos métodos clássicos para a agregação dos objetivos (Deb, 2001; Lobato, 2008). Neste cenário, a próxima seção apresenta a descrição da estratégia básica de otimização para o desenvolvimento do algoritmo multi-objetivo proposto.

#### 3.1 Flower Pollinization Algorithm

##### 3.1.1 Inspiração Biológica

Na natureza, estima-se que existam mais de um quarto de milhão de tipos diferentes de plantas e que, deste total, cerca de 80% são espécies com flores (Yang, 2012). É inegável a importância das flores na evolução da fauna e da flora ao longo dos anos, sendo que a sua principal contribuição está na realização do processo de polinização. A polinização nas florestas se dá, tipicamente, pela transferência de pólen através da contribuição de diferentes espécies, tais como insetos, pássaros, morcegos, dentre outros (Glover, 2007). Este tipo de polinização, que compreende 90% das plantas, é denominada de biótica e conta com cerca de 200000 variedades de agentes polinizadores. Por outro lado, os outros 10% restantes pertencem à classe abiótica e não requerem polinizadores. Neste caso, o vento e difusão na água ajudam no processo de polinização de várias plantas (Glover, 2007; Yang, 2012).

Uma característica interessante dos agentes polinizadores é que tendem a visitar certas espécies de flores, ignorando outras. Tal característica representa uma vantagem evolutiva,

visto que a transferência de pólen de flores para uma mesma espécie é maximizada, o que implica na reprodução de determinadas espécies de flores (Yang, 2012). Essa transferência de pólen pode ser realizada via autopolinização ou por polinização cruzada. A polinização cruzada, ou alogamia, é aquela que pode acontecer a partir de pólen de uma flor de uma planta diferente, enquanto auto-polinização é a fertilização de uma mesma flor (Glover, 2007). A associação entre os mecanismos de polinização cruzada e biótica representa, na natureza, a capacidade dos agentes polinizadores percorrerem longas distâncias, o que do ponto de vista da otimização é uma característica interessante (polinização global) (Yang, 2012). Por fim, como descrito por Yang (2012), o movimento voo de determinadas espécies de insetos como abelhas e pássaros pode ser modelado via distribuição de Lévy (Pavlyukevich, 2007).

### 3.1.2 Procedimento Geral

A partir das características citadas na seção anterior, Yang (2012) propôs o *Flower Pollinization Algorithm* (FPA), cuja concepção pode ser resumida nas seguintes etapas:

1. A polinização biótica e cruzada é considerada como um processo global de polinização em que os polinizadores se comportam como modelo de distribuição de Lévy;
2. Já a polinização abiótica e a autopolinização são consideradas como uma etapa que corresponde a polinização local;
3. A polinização local e a polinização global são controladas por uma probabilidade de troca  $p \in [0, 1]$ ;
4. Devido à proximidade física e outros fatores, como o vento, a polinização local pode ter uma fração significativa  $p$  nas atividades globais de polinização;
5. Para fins de simplificação, cada planta tem apenas uma única flor e cada flor pode liberar apenas uma unidade de pólen.

No FPA podem ser destacados dois passos principais, a saber, a polinização global e a polinização local. Na etapa de polinização global, os pólenes das flores são carregados por polinizadores, podendo viajar por longas distâncias. Isso garante a polinização e a reprodução das flores mais aptas (candidatos à solução do problema de otimização). Matematicamente, este procedimento pode ser descrito como segue:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + L(\lambda)(x_i^t - g_{best}) \quad (8)$$

em que  $x_i^t$  é o  $i$ -ésimo pólen (vetor de solução  $x_i$  na  $t$ -ésima geração),  $g_{best}$  é a melhor solução encontrada até a  $t$ -ésima geração, e o parâmetro  $L$  é o tamanho do passo da polinização, visto que os insetos podem se mover por longas distâncias com diferentes tamanhos de passos. Esse parâmetro é determinado a partir da avaliação da distribuição Lévy:

$$L \square \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi\lambda/2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}}, \quad (s \square 0) \quad (9)$$

em que  $\Gamma(\lambda)$  é a função gama padrão (Como sugerido por Yang (2012), em todas as simulações foi considerado  $\lambda$  como sendo igual a 1,5), e  $s$  é um número aleatório com distribuição normal.

A polinização local pode ser representada pela seguinte relação:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \varepsilon(x_j^t - x_k^t) \quad (10)$$

em que  $x_j^t$  e  $x_k^t$  representam pólenes de diferentes flores de uma mesma espécie de planta. Do ponto de vista matemático, se  $x_j^t$  e  $x_k^t$  vêm da mesma espécie ou se são selecionados da mesma população, tem-se uma busca em que o caminho é puramente aleatório e ponderado por um aleatório  $\varepsilon$  com distribuição uniforme entre  $[0,1]$ . Para alternar a entre a busca global e a local, faz-se uso de uma probabilidade de troca  $p$  (ou probabilidade de proximidade), geralmente considerada como sendo igual a 0,8 (Yang, 2012). Assim, caso seja gerado um aleatório menor que este valor, procede-se a busca global, caso contrário tem-se a busca local.

A Tabela 1 apresenta as etapas básicas do FPA (Yang, 2012):

Tabela 1 – Etapas básicas do FPA.

---

<i>Parâmetros de entrada: função objetivo, número de variáveis de projeto, espaço de projeto, tamanho da população (n), número de gerações e probabilidade de troca (p)</i>
<i>Inicializar a população aleatoriamente</i>
<i>Determinar a melhor solução corrente (<math>g_{best}</math>)</i>
<b>Enquanto</b> o número de gerações não é alcançado faça
<b>Para</b> $i = 1:n$
<b>Se</b> $rand < p$ ,
<i>Gere um novo candidato via polinização global</i>
<b>Senão</b>
<i>Gere um novo candidato via polinização local</i>
<b>Fim Se</b>
<i>Avalie novas soluções</i>
<i>Se as novas soluções são melhores, atualize a população e armazene a melhor solução obtida</i>
<b>Fim Para</b>
<b>Fim Enquanto</b>
<i>Imprima os resultados</i>

---

### 3.2 Multi-objective Optimization Flower Pollinization Algorithm

Devido ao sucesso observado com a aplicação do FPA em diferentes estudos de caso, a sua extensão para o contexto multi-objetivo tem sido objeto de pesquisas. Dentre estas, pode-se citar Yang e Karamanoglu (2013) e Yang *et al.* (2014), que resolveram problemas matemáticos e de engenharia usando o método da soma ponderada associado ao FPA. Nestes dois trabalhos foi aplicado um método de agregação de objetivos, o que justifica o desenvolvimento de uma estratégia considerando o FPA e o conceito de ótimo no contexto multi-objetivo.

A estratégia proposta neste trabalho e denominada como *Multi-objective Optimization Flower Pollinization Algorithm* (MOFPA) apresenta como metodologia para a geração de candidatos conforme o FPA associado aos operadores de ordenamento por rank (em que é empregado o conceito de dominância de Pareto) e de truncamento das soluções não dominadas (Operador de Distância da Multidão – *Crowding Distance Operator*).

Em linhas gerais, o MOFPA apresenta a seguinte estruturação: inicialmente, uma população com  $N$  indivíduos é gerada aleatoriamente, respeitando-se os limites impostos para cada uma das variáveis de projeto. Para gerar os candidatos que irão compor a população corrente, a estratégia apresentada anteriormente para a geração de candidatos no FPA é aplicada. Esta nova população é agrupada com a população antiga, formando assim a população  $P_1$  de tamanho  $2N$ .  $P_1$  é então classificada segundo o critério de dominância de Pareto. De forma geral, este critério consiste na organização dos indivíduos da população em fronteiras que refletem sua importância no processo evolutivo da seguinte maneira: inicialmente, através do critério de dominância, a população é classificada e tomada como Rank 1. Esses indivíduos de

Rank 1 são retirados da população. A população restante é novamente classificada segundo esse critério de dominância, sendo que essa população assume Rank 2. Esses indivíduos são retirados da população atual e novamente é realizada a classificação dos indivíduos que restaram. Tal procedimento é repetido até que todos os indivíduos da população sejam classificados.

A população  $P_1$ , com  $2N$  indivíduos, deve ser reduzida de modo que o número de indivíduos da população, informado pelo usuário, seja preservado ao final do processo evolutivo. Além disso, esse número deve ser reduzido visto que ao final do processo evolutivo a tendência é que o conjunto com os pontos não dominadas aumente de tamanho devido a inserção de novos indivíduos aos presentes na solução corrente. Assim, a população corrente é truncada de acordo com o Operador de Distância da Multidão (Deb, 2001). De forma geral, neste operador os pontos que são muito próximos de outros são eliminadas de modo que se tenha ao final do processo pontos bem distribuídos no domínio do espaço de objetivos.

O processo continua até que um determinado critério de parada ser satisfeito.

#### 4. METODOLOGIA

O controlador foi projetado utilizando o regulador linear quadrático, sendo que o esforço de controle era calculado a partir da matriz de ganho do controlador  $[K_G]$  e dos vetores de deslocamento e velocidade no domínio modal, conforme apresentado na Eq. (3). Visando aumentar a eficiência do controle de vibrações associado a um baixo consumo energético, foram inseridas duas constantes  $c_1$  e  $c_2$  que multiplicam o deslocamento e a velocidade modais, respectivamente.

$$\{x(t)\} = \begin{cases} c_1 \times \{d(t)\} \\ c_2 \times \{\dot{d}(t)\} \end{cases} \quad (11)$$

na qual  $0 \leq c_1 \leq 100$  e  $0 \leq c_2 \leq 100$  (espaço de projeto).

No presente trabalho, o objetivo era encontrar uma boa relação entre consumo de energia e a atenuação de vibração. Para tanto, foram definidas duas funções objetivo:  $F_1$  (relacionada à resposta do sistema) e  $F_2$  (referente à corrente elétrica).

$$F_1 = \|x(t)\| \quad (12)$$

$$F_2 = \int I dt \quad (13)$$

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta a Curva de Pareto e o comportamento das variáveis de projeto considerando 50 indivíduos, 250 gerações uma probabilidade igual a 0,8. A Curva de Pareto obtida pelo MOFPA (Fig. 2(a)) apresenta um comportamento não convexo dos objetivos. Além disso, observa-se que aumento no consumo energético implica na redução da vibração e vice-versa (respostas conflitantes). Neste caso, foram selecionados 3 pontos (verde – Ponto A, vermelho – Ponto B e azul – Ponto C) desta curva para analisar os comportamentos obtidos, conforme a Tab. 1.

A partir dos resultados apresentados na Fig. 2(b), observa-se uma maior influência do parâmetro  $c_2$  no valor da função objetivo  $F_1$ . O aumento desta variável contribui para a atenuação da resposta, visto que ela resulta em um aumento no amortecimento da estrutura, mas que, no entanto, resulta um maior aumento no consumo energético. Já a variável de projeto  $c_2$ , apresenta uma menor influência no comportamento das funções objetivo, visto que seus valores apresentaram, de um modo geral, pequenas variações em relação a variável  $c_1$ .

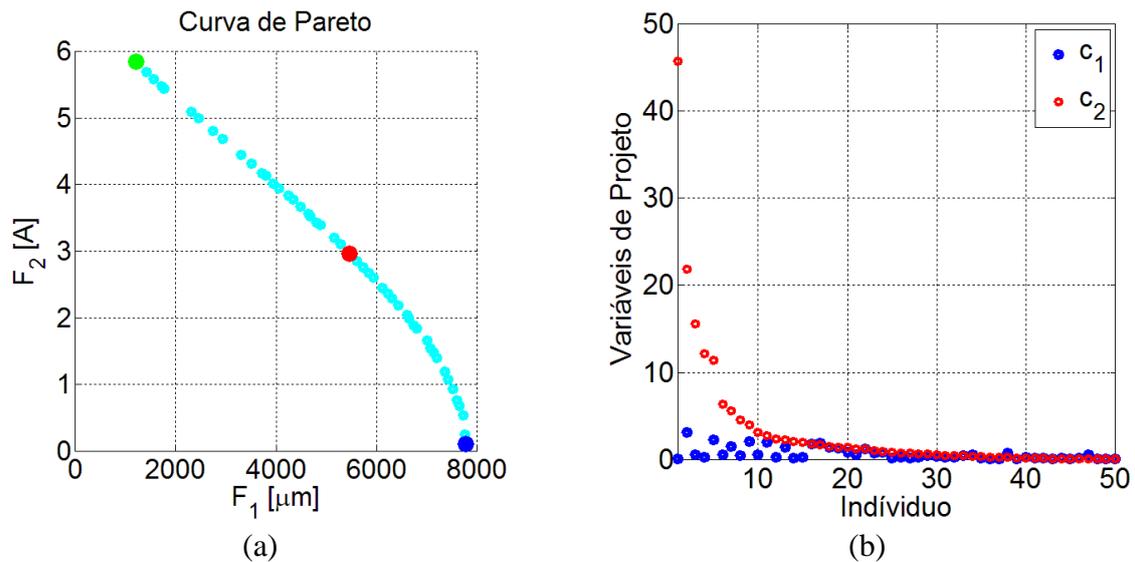


Figura 2 – Resultados da Otimização: (a) Curva de Pareto e (b) Variáveis de Projeto.

Tabela 1 –Dados dos Pontos A, B e C da Curva de Pareto.

Pontos	$c_1$	$c_2$	$F_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$F_2$ [A]
A	0,0022	45,7401	1212,6583	5,8468
B	0,1454	0,8254	5453,2089	2,9676
C	0,0168	0,0006	7771,6017	0,1025

A fim de analisar comportamento da resposta do sistema controlado considerando as variáveis de projeto otimizadas, as órbitas do rotor flexível foram obtidas considerando uma velocidade de rotação de 1670 rpm. A Figura 3 apresenta as órbitas e a corrente elétrica utilizado pelos atuadores eletromagnéticos. Nesta figura, as órbitas do rotor considerando o sistema com o controle desligado e o controle considerando os parâmetros obtidos são comparadas (ver a Tab. 1). Conforme pode ser observado na Fig. 3(a), os dados referentes ao ponto C demonstram que o sistema não foi controlado, visto que a órbita ficou próxima ao do sistema com o controle desligado. Já na Figura 3(b) observa-se que o consumo energético foi baixo, resultando na não efetividade do controle ativo de vibrações. Já o ponto A representa uma atenuação significativa na resposta do sistema, todavia acompanhado de um aumento no consumo de energia, conforme pode ser observado nos gráficos das Figs. 3(a) e 3(b). Finalmente ressalta-se que, devido ao caráter não convexo da Curva de Pareto, que a aplicação de técnicas tradicionais para agregação, como o Método da Soma Ponderada, não são eficazes para a resolução do mesmo, o que enfatiza a necessidade da aplicação de uma abordagem multi-objetivo baseada em população.

## 6. CONCLUSÕES

A presente contribuição teve por objetivo minimizar simultaneamente o nível de vibração e o consumo energético em atuadores eletromagnéticos através da determinação de parâmetros de um controlador empregado para essa finalidade. Assim sendo, foi desenvolvida uma nova estratégia de otimização, a saber, o *Multi-Objective Optimization Flower Pollinization Algorithm* (MOFPA), que consiste da associação entre a técnica FPA, para a geração de candidatos em potencial, e os operadores de ordenamento por *rank* e de truncamento das

soluções não dominadas. De forma geral, foi observado que, em todas as execuções do MOFPA, sempre foi obtida a mesma curva de Pareto, demonstrando a robustez da abordagem proposta. Do ponto de vista físico, foi constatado o caráter conflitante entre os dois objetivos, visto que a redução do nível de vibração implica no aumento do consumo energético e vice-versa. Neste caso, foi escolhido um ponto considerado ótimo que representa um bom compromisso entre estes dois objetivos. Como proposta de trabalho futuro, pretende-se avaliar os resultados considerando técnicas de robustez e confiabilidade.

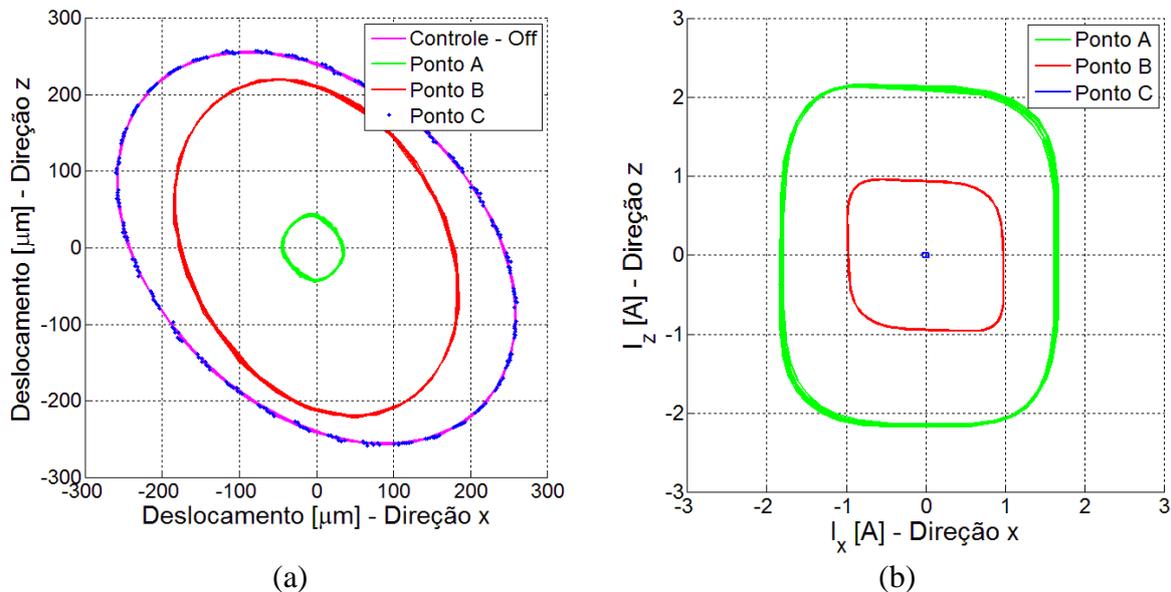


Figura 3 – Resultados da Otimização: (a) Órbita e (b) Corrente Elétrica.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq, da CAPES e da FAPEMIG para a realização deste trabalho. Valder Steffen Jr agradece ainda o apoio do INCT-EIE.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abduljabbar, Z., ElMadany, M. M. e AlAbdulwahab, A. A. (1996), “Active Vibration Control of a Flexible Rotor”, *Computers & Structures*, v. 58, pp. 499-511.
- Das, A. S., Dutt, J. K. e Ray. K. (2011), “Active Control of Coupled Flexural-Torsional Vibration in a Flexible Rotor-Bearing System using Electromagnetic Actuator”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, v. 46, pp. 1093-1109.
- Deb, K. (2001). “Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms”, First edition. New York, John Wiley and Sons.
- Glover, B. J. (2007), “Understanding Flowers and Flowering: An Integrated Approach”, Oxford University Press.
- Koroishi, E. H., Borges, R. A., Cavalini Jr, A. Ap. e Steffen Jr, V. (2014), “Numerical and Experimental Modal Control of Flexible Rotor Using Electromagnetic Actuator”, *Mathematical Problems in Engineering (Print)*, v. 2014, p. 1-14..
- Fernandes, M. V., Rocha, L. A. A., Koroishi, E. H. e Steffen Jr, V. (2014), “Otimização de Parâmetros Aplicados no Controle de Vibrações de Rotores Flexíveis Utilizando Técnicas Heurísticas”, Anais do VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2014.
- Lobato, F. S. (2008), “Otimização Multi-Objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Pavlyukevich, I. (2007), “Lévy Flights, Non-Local Search and Simulated Annealing.” *Journal of Computational Physics* 226: 1830–1844.

- Yang, X.-S., Mehmet, K. e Xingshi, H. (2014), “Flower Pollination Algorithm: A Novel Approach for Multiobjective Optimization”, *Engineering Optimization*, 46:9, 1222-1237.
- Yang, X.-S., Karamanoglu, M. e He, H. (2013), “Multi-objective Flower Algorithm for Optimization”, *Procedia Computer Science*, 18, 861–868, doi: 10.1016/j.procs.2013.05.251.
- Yang, X.-S. (2012), “Flower Pollination Algorithm for Global Optimization.” *In Unconventional Computation and Natural Computation*, Edited by J. Durand-Lose and N. Jonoska, Vol. 7445 of Lecture Notes in Computer Science, 240–249. Berlin: Springer.

## **MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FLOWER POLLINIZATION APPLIED TO VIBRATION CONTROL OF FLEXIBLE ROTORS**

**Abstract.** *In mechanical engineering, the active vibration control applied to flexible rotors represents a field with great potential of development. In general, this type of control requires actuators to apply the control force to the structure. For this purpose, electromagnetic actuators were used in the present contribution, which are distinguished by the application of forces without the need of mechanical contact, but requires high energy cost as a counterpart. In this case, it is necessary to minimize both the vibration and the energy consumption, i.e., to find the solution of a multi-objective optimization problem. To solve this multi-objective problem, the Multi-Objective Optimization Flower Algorithm Pollinization is considered. This new optimization technique consists in the extension of the Flower Pollinization Algorithm by incorporating two operators, namely, Pareto dominance and Crowd Distance, respectively. The results obtained with the determination of the optimal controller parameters demonstrated the conflicting nature of the objectives.*

**Keywords:** *Multi-Objective Optimization, Flower Pollinization Algorithm, Vibration Active Control, Flexible Rotors.*