

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DE AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS PARA REDUÇÃO DE  
VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A EVENTOS SÍSMICOS

por

Guilherme Flores Heck

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 11 de junho de 2018.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

OTIMIZAÇÃO DE AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS PARA REDUÇÃO DE  
VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS SUBMETIDAS A EVENTOS SÍSMICOS

por

Guilherme Flores Heck

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 11 de junho de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a meus pais, por todo apoio dado durante o curso, mesmo em situações difíceis e principalmente auxiliando a superar os obstáculos encontrados.

À minha orientadora, Letícia Fleck Fadel Miguel, por ter tornado este trabalho possível, pela total compreensão e suporte durante a elaboração do trabalho, sempre disponível para esclarecimento de dúvidas.

A todos os professores da UFRGS envolvidos em minha formação, ao longo de todo curso, agradeço pela dedicação tão importante em meu desenvolvimento.

Aos meus amigos, sempre compreensivos e companheiros.

À minha namorada, Laura Domingues, pela participação em todo o período do curso ao meu lado, agradeço pelo companheirismo presente nos momentos de dificuldade e por compartilhar as celebrações nos momentos de vitória.

HECK, G.F. **Otimização de amortecedores de massa sintonizados para redução de vibrações em estruturas submetidas a eventos sísmicos**. 2018. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a otimização de Amortecedores de Massa Sintonizados (AMS) presentes em edifícios, para minimização do deslocamento máximo no topo da estrutura quando submetida a diferentes abalos sísmicos. Uma rotina computacional foi desenvolvida em MATLAB® para a solução das equações de movimento da estrutura (Método de *Newmark*), no domínio do tempo. Com cada um dos andares representando 1 Grau de Liberdade (GDL), a análise foi feita em uma dimensão. Posteriormente, 2 algoritmos meta-heurísticos de otimização (*Search Group Algorithm - SGA* e *Firefly Algorithm - FA*) foram utilizados para obtenção dos parâmetros ótimos do AMS – minimizar os deslocamentos já citados. Na primeira etapa, manteve-se fixo o AMS no topo da estrutura com uma razão de massa (sobre a massa total do edifício) constante; para a otimização, as variáveis consideradas foram a rigidez e o amortecimento do AMS. Duas estruturas distintas foram analisadas sob excitações reais (sismos registrados) e uma artificial (gerada através do espectro de *Kanai-Tajimi*). Após comparados os resultados, em relação à situação sem nenhum AMS - obtendo-se redução significativa dos deslocamentos para todos os casos propostos - a primeira etapa foi validada. Foi também comprovado que, para apenas 1 AMS instalado, sua melhor posição é no último andar. Para a segunda etapa, um método utilizando Múltiplos Amortecedores (MAMS) foi proposto. Para fins de comparação com os resultados anteriores, apenas uma das estruturas foi analisada. Os MAMS foram distribuídos horizontalmente e verticalmente ao longo do edifício, sempre mantendo a massa total (soma das massas) limitada. Os resultados desenvolvidos no trabalho mostraram-se satisfatórios quando comparados à literatura existente, sendo sempre muito semelhantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Amortecedor de massa sintonizado (AMS); Otimização; Excitação sísmica; Edifícios.

HECK, G.F. **Optimization of tuned mass dampers for vibrations reduction in structures subjected to seismic events**. 2018. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **ABSTRACT**

The following paper aims at the optimization of Tuned Mass Dampers (TMD) present on buildings, in order to minimize the maximum displacement at the top of the structure when subjected to different seismic events. A computational routine was developed using MATLAB® in order to solve the structure's equations of motion (Newmark's Method). Considering each floor as 1 Degree of Freedom (DOF), the analysis was done in one dimension. Afterwards, 2 meta-heuristic optimization algorithms (Search Group Algorithm - SGA and Firefly Algorithm - FA) were used to obtain the optimal TMD parameters - minimize the already mentioned displacements. In the first step, the TMD was fixed to the top of the structure with a constant mass ratio (as a fraction of the total structure mass); for the optimization, the considered variables were the stiffness and damping of the TMD. Two distinct structures were analyzed under real seismic events (recorded earthquakes acceleration data) and an artificial one (generated using the Kanai-Tajimi spectrum). After comparing the results, in relation to the situation without any TMD - obtaining a significant displacements reduction for all the proposed cases - the first step was successfully validated. It has also been proven that, for only 1 TMD installed, its best position is on the top floor. In the second step, a method using Multiple Tuned Mass Dampers (MTMD) was proposed. For purposes of comparison with previous results, only one of the structures was analyzed. The MTMD were distributed horizontally and vertically throughout the building, always maintaining the total mass (mass sum) limited. The results developed in this study were satisfactory when compared to the existing literature, being always very similar.

**KEYWORDS:** Tuned mass damper (TMD); Optimization; Seismic excitation; Buildings.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
4.1. Sistemas de Controle de Vibrações .....	2
4.1.1. Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS) .....	2
4.2. Equação de Movimento .....	2
4.2.1. Sistema com 1 Grau de Liberdade (GDL).....	2
4.2.1. Sistema com 'n' Graus de Liberdade submetido a uma Aceleração na Base.....	3
4.3. Método de Newmark .....	3
4.4. Sistema com 1 AMS instalado no topo.....	4
4.5. Sistema com Múltiplos Amortecedores de Massa Sintonizados (MAMS) .....	4
4.5. Algoritmos meta-heurísticos de otimização.....	6
4.5.1. <i>Search Group Algorithm</i> (SGA) .....	6
4.5.2. <i>Firefly Algorithm</i> (FA) .....	6
5. METODOLOGIA .....	7
5.1. Modelagem matemática das estruturas a serem analisadas (MATLAB).....	7
5.2. Verificação numérica após a adição de 1 AMS no topo .....	7
5.3. Excitações utilizadas .....	7
5.3.1. Sismos reais .....	7
5.3.2. Sismo artificial .....	8
5.4. Utilização de Múltiplos Amortecedores (MAMS).....	9
5.4.1. MAMS distribuídos horizontalmente no topo do Edifício A .....	9
5.4.2. MAMS distribuídos verticalmente ao longo do Edifício A.....	9
5.5. Otimização.....	9
5.5.1. 1 AMS instalado.....	10
5.5.2. 10 AMS instalados no topo do Edifício A.....	10
5.5.3. 4 AMS dispostos no Edifício A .....	10
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	10
6.1. Verificação dos Algoritmos.....	10
6.2. Otimização dos Parâmetros .....	11
6.2.1. 1 AMS instalado.....	11
6.2.2. MAMS instalados.....	13
6.3. Comparação dos Resultados .....	13

6.3.1. Sem AMS x 1 AMS instalado no Topo com parâmetros otimizados .....	13
6.3.2. MAMS com parâmetros otimizados x 1 AMS no topo com parâmetros otimizados .....	14
7. CONCLUSÕES .....	14
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo de estruturas sempre foi um tema muito importante em Engenharia. Atualmente, além do fator segurança, o custo é altamente levado em conta quando se é feito um projeto estrutural. Estruturas mais leves e esbeltas sempre são levadas em conta para a otimização de projetos. Contudo, exige-se um conhecimento mais aprofundado de mecânica estrutural por parte do projetista.

Além da análise estática, é muito importante que também seja realizada a análise dinâmica. Os carregamentos dinâmicos - como a ação do vento e abalos sísmicos - têm potencial de dano muito maior, caso não sejam devidamente considerados.

Com o objetivo de minimizar as ações dinâmicas - amplitudes de vibração - em edifícios, utilizam-se (dentre outras alternativas) amortecedores de massa sintonizados (AMS). O AMS consiste em um sistema passivo de dissipação de energia. Ao contrário dos sistemas ativos e semiativos, não necessita de energia externa para seu funcionamento. Através da inclusão de uma massa interligada à estrutura (geralmente no topo da mesma) é possível reduzir os deslocamentos máximos quando a estrutura é excitada dinamicamente. Seu uso vem crescendo nas últimas décadas em decorrência da sua fácil instalação (quando comparado com outros dispositivos), baixo índice de manutenção e bom custo-benefício.

Como demonstrado no artigo de Miguel et al., 2016, a versatilidade desses dispositivos é grande. Pode-se utilizar um único amortecedor ou vários (Múltiplos Amortecedores de Massa Sintonizados, ou MAMS). Além disso, é possível variar também sua posição (tanto vertical, entre andares, quanto horizontal, no mesmo andar). Em conjunto, os parâmetros de massa, rigidez e amortecimento de cada dispositivo são determinantes para sua eficiência (redução das respostas dinâmicas).

Este trabalho tem como motivação o estudo acerca da otimização do uso de Amortecedores de Massa Sintonizados, buscando configurações (conjunto de parâmetros) que possam minimizar estes efeitos dinâmicos em edifícios, sob condições diversas.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo obter os deslocamentos mínimos no topo de 2 edifícios distintos retirados da literatura (Bekdaş et al., 2011) sob 3 tipos diferentes de excitações sísmicas utilizando dispositivos passivos de redução de vibrações chamados de Amortecedores de Massa Sintonizados (AMS). Otimizar os parâmetros do amortecedor com o objetivo de obter sua melhor eficiência, quando mantida a massa constante. Determinar a posição ideal (máxima redução de vibrações) de instalação, para um único amortecedor e realizar uma breve análise a respeito do uso de Múltiplos Amortecedores de Massa Sintonizados (MAMS).

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos relacionados à otimização de AMS podem ser encontrados. Dentre eles, deve-se destacar o artigo de (Bekdaş et al., 2011), onde 1 AMS foi utilizado no topo de dois edifícios distintos, submetidos ao sismo de *El Centro* (1940) NS. Este trabalho propôs uma redução significativa nos deslocamentos, quando comparado com a mesma análise feita por outros autores (Miguel et al., 2013), utilizando o mesmo estudo, propõe uma divergência nos resultados obtidos por (Bekdaş et al., 2011), apresentando valores quase idênticos aos dos demais autores (Lee et al., 2016; Hadi et al., 1998). A estrutura analisada é bastante utilizada na literatura, assim como a excitação.

O algoritmo proposto por (Schaan, 2014), gera, a partir de parâmetros de entrada, um sismo aleatório no domínio do tempo. O mesmo emprega o método de *Kanai-Tajimi* para geração de um sismo no domínio da frequência e, posteriormente, através da equação de *Shinozuka*, o sinal é convertido para o domínio do tempo. Este método reproduz acelerações aleatórias e é

bastante empregado na engenharia. Os parâmetros de entrada (características do solo na região analisada) são: razão de amortecimento, frequência natural e pico de aceleração. Os parâmetros utilizados foram coincidentes com os propostos por (Mohebbi et al., 2013), com o objetivo de validação dos resultados.

Segundo (Gonçalves et al., 2015), o *Search Group Algorithm* (SGA) é um dos muitos algoritmos meta-heurísticos existentes para otimização. Este é um dos mais recentes algoritmos desenvolvidos nessa gama. Seu desenvolvimento teve como motivação a análise de estruturas treliçadas, e demonstrou resultados bastante satisfatórios. Outro exemplo é o *Firefly Algorithm*, proposto por (Xin-She Yang, 2009). Inspirado pelo comportamento de piscar de vaga-lumes, é largamente utilizado em trabalhos que envolvem otimização matemática. No presente estudo, a utilização de ambos não tem fins comparativos; dessa forma, espera-se obter resultados de deslocamento mínimo idênticos ou muito semelhantes pelos dois algoritmos.

Estudos a respeito do uso de múltiplos amortecedores (MAMS) também podem ser encontrados. Em (Miguel et al., 2016) são analisadas diferentes configurações, onde os amortecedores são espalhados horizontalmente (topo do edifício, 10 AMS) e verticalmente (1 AMS em cada andar). Comparado com a análise utilizando um único amortecedor, não apresentou valores significativamente vantajosos, para o caso analisado. Também apresentou um custo computacional elevado, pela adição de parâmetros para a otimização. Porém, o autor destaca ser um estudo promissor por sua versatilidade, com alto potencial tanto na otimização dos resultados, quanto no custo-benefício do projeto.

## **4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **4.1. Sistemas de Controle de Vibrações**

Sistemas de controle de vibrações são dispositivos cuja finalidade é reduzir amplitudes de vibração em estruturas. Estes podem ser passivos, semiativos e ativos. Os sistemas ativos e semiativos têm capacidade de adaptarem-se à carga imposta; contudo, demandam energia externa para seu funcionamento. Os sistemas de controle passivos, por sua vez, não demandam energia externa. Desta forma, os sistemas passivos possuem vantagens como custo, fácil instalação, baixo índice de manutenção e simplicidade.

#### **4.1.1. Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS)**

Dentre os sistemas dissipativos passivos, destaca-se o Amortecedor de Massa Sintonizado (AMS). Esse dispositivo é composto por uma massa ligada à estrutura por meio de uma mola (rigidez) e um amortecedor (amortecimento). Usualmente instalado no topo de estruturas, tem o objetivo de atenuar vibrações. Sintonizado na frequência do primeiro modo de vibração da estrutura, o mesmo vibra absorvendo a energia que seria transmitida inteiramente à estrutura. Dessa forma, a estrutura como um todo adquire uma nova frequência natural, deixando de entrar em ressonância com a excitação (fonte externa de energia). O resultado é uma redução no deslocamento resultante (amplitude de vibração). Por motivos de custo e facilidade na instalação, usualmente se limita a massa do AMS em 3% da massa total da estrutura.

### **4.2. Equação de Movimento**

#### **4.2.1. Sistema com 1 Grau de Liberdade (GDL)**

O modelo esquemático de um sistema com 1 GDL pode ser representado pela Figura 4.1 (Paredes, 2018).

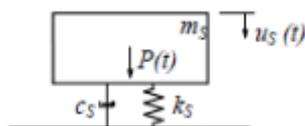


Figura 4.1 – Modelo esquemático estrutural para 1 GDL.

A equação (4.1) governa o movimento, para o caso com 1 GDL. A massa é representada por  $m_s$ , a rigidez da mola por  $k_s$  e o amortecimento por  $c_s$ . O deslocamento é indicado por  $u_s(t)$  e a força externa aplicada por  $P(t)$ .

$$m_s \ddot{u}_s(t) + c_s \dot{u}_s(t) + k_s u_s(t) = P_0 \text{sen}(\omega t) \quad (4.1)$$

#### 4.2.1. Sistema com 'n' Graus de Liberdade submetido a uma Aceleração na Base

Para um sistema com 'n' GDL, onde a carga externa é a aceleração em sua base, o movimento é governado pela equação (4.2).

$$[M]\ddot{\vec{x}}(t) + [C]\dot{\vec{x}}(t) + [K]\vec{x}(t) = -[M]\ddot{\vec{x}}_g(t) = \vec{F}(t) \quad (4.2)$$

A matriz  $[M]$  possui os valores de massa, em sua diagonal. O amortecimento é dado pela matriz  $[C]$  e a rigidez pela matriz  $[K]$ . As matrizes possuem um tamanho  $(n \times n)$ . Já os vetores  $\ddot{\vec{x}}(t)$ ,  $\dot{\vec{x}}(t)$  e  $\vec{x}(t)$  representam as respostas no tempo da aceleração, velocidade e posição (respectivamente) para cada um dos GDL.

Quando a estrutura é submetida a uma aceleração em sua base, o produto  $[M]\ddot{\vec{x}}_g(t)$  representa a Força Externa atuante. A aceleração  $\ddot{\vec{x}}_g(t)$  é obtida através dos acelerogramas (valores de aceleração em função do tempo) dos abalos sísmicos considerados.

#### 4.3. Método de Newmark

Para a solução de equações diferenciais complexas é necessário que se use um método numérico de integração, pela ausência de soluções analíticas. Os métodos existentes para integração numérica são classificados em dois tipos: implícitos e explícitos. Os métodos implícitos, se corretamente utilizados, são incondicionalmente estáveis, portanto, bastante utilizados em diversos problemas matemáticos.

Dentre os métodos implícitos, destaca-se o Método de Newmark. A posição é calculada através da equação (4.3), a velocidade pela equação (4.4) e a aceleração equação (4.5):

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0[M] + a_5[C] + [K])^{-1} \cdot \{ \vec{F}(t_{i+1}) - [M][a_0\vec{x}(t_i) + a_1\dot{\vec{x}}(t_i) + a_2\ddot{\vec{x}}(t_i)] + [C][a_5\vec{x}(t_i) + a_6\dot{\vec{x}}(t_i) + a_7\ddot{\vec{x}}(t_i)] \} \quad (4.3)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6\dot{\vec{x}}(t_i) - a_7\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.4)$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1\dot{\vec{x}}(t_i) - a_2\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.5)$$

O instante de tempo  $(i+1)$  é representado por  $(t+\Delta t)$ . O intervalo de tempo  $\Delta t$  influenciará diretamente na precisão dos resultados e é pré-determinado; contudo, influencia também no custo computacional. As constantes 'a' são obtidas como indicado no conjunto de equações (4.6):

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} ; a_1 = \frac{1}{\alpha \Delta t} ; a_2 = \frac{1}{2\alpha} - 1 ; a_3 = (1 - \delta)\Delta t \quad (4.6)$$

$$a_4 = \delta \Delta t ; a_5 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t} ; a_6 = \left( \frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) ; a_7 = \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right)$$

O método é incondicionalmente estável para os valores  $\alpha=0,25$  e  $\delta=0,5$ . Para o primeiro instante de tempo ( $t_0$ ) é necessário que se tenha os valores de deslocamento, velocidade e aceleração iniciais. A equação (4.7) calcula a aceleração inicial:

$$\ddot{\vec{x}}(t_0) = [M]^{-1}[\vec{F}(t_0) - [C]\dot{\vec{x}}(t_0) - [K]\vec{x}(t_0)] \quad (4.7)$$

#### 4.4. Sistema com 1 AMS instalado no topo

O sistema com um único AMS instalado no topo do edifício torna-se simples. Sua análise é feita acrescentando 1 GDL na parte superior da estrutura - análogo a analisar um prédio com um andar a mais. A massa do AMS é adicionada como último termo da diagonal da matriz  $[M]$ . Sua rigidez e amortecimento são adicionados às matrizes  $[K]$  e  $[C]$ , respectivamente. A dimensão das matrizes será  $[n \times (n+1)]$ , sendo 'n' o número de andares do edifício. A Figura 4.2 representa esquematicamente como seria adicionado o AMS à uma estrutura com 'n' andares.

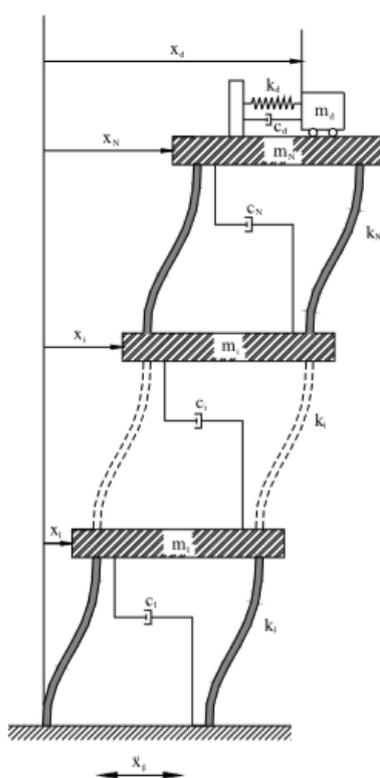


Figura 4.2 – Esquemática de estrutura com 1 GDL a mais após a adição de 1 AMS.

#### 4.5. Sistema com Múltiplos Amortecedores de Massa Sintonizados (MAMS)

Além do sistema com um único AMS, pode-se também utilizar diferentes configurações. O número de amortecedores pode ser variado, assim como sua localização no edifício. Não é incomum o uso de mais de um amortecedor, mesmo que instalados no mesmo andar, graças à versatilidade e manutenção dos mesmos. Uma massa significativa poderia ser dividida em diversas massas menores. A Figura 4.3 demonstra, esquematicamente, como poderiam ser distribuídos os AMS ao longo do edifício (Miguel et al., 2016). É possível identificar que, no prédio de 'n' andares, há uma diversidade grande de configurações possíveis quanto à distribuição dos amortecedores (tanto vertical quanto horizontalmente).

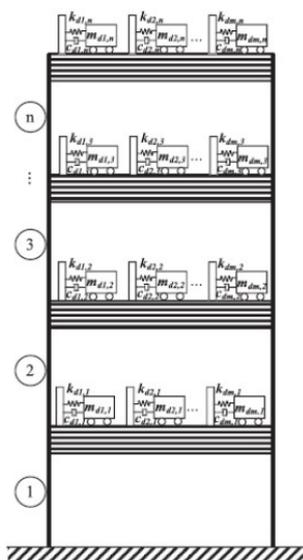


Figura 4.3 – Edifício de ‘n’ andares com Múltiplos Amortecedores de Massa Sintonizados.

A matriz de massa  $[M]$  recebe os valores de massa dos MAMS em sua diagonal (ao final, como mostra a Figura 4.4). Já as matrizes  $[K]$  e  $[C]$  são construídas conforme indicado pela Figura 4.5 (Miguel et al., 2016). Suas dimensões serão  $[(n+m) \times (n+m)]$ , onde ‘n’ representa o número de andares do edifício, e ‘m’ o número de amortecedores instalado (total, independentemente de sua localização).

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_{n-1} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_n & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & m_{d1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & m_{d2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & m_{d_{N_{\text{tmd}}-1}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_{d_{N_{\text{tmd}}}} \end{bmatrix}$$

Figura 4.4 – Construção da matriz  $[M]$  para o caso com MAMS.

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 + \sum_{i=1}^{N_{\text{AMS}}^{1stFloor}} k_{d1i} & -k_2 & \dots & 0 & -k_{d11} & -k_{d12} & \dots & -k_{d1n} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 + \sum_{i=1}^{N_{\text{AMS}}^{2ndFloor}} k_{d2i} & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -k_{d2} & -k_{d22} & \dots & -k_{d2n} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & k_n + \sum_{i=1}^{N_{\text{AMS}}^{NrdFloor}} k_{dni} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & -k_{dn1} & -k_{dn2} & \dots & -k_{dnn} \\ -k_{d11} & 0 & \dots & 0 & k_{d11} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -k_{d12} & 0 & \dots & 0 & 0 & k_{d12} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_{d1n} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & k_{d1n} & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -k_{d21} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & k_{d21} & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -k_{d22} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & k_{d22} & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -k_{d2n} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & k_{d2n} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -k_{dn1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & k_{dn1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -k_{dn2} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & k_{dn2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -k_{dnn} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & k_{dnn} \end{bmatrix}$$

Figura 4.5 – Construção da matriz  $[K]$  para o caso com MAMS (análogo à construção da matriz  $[C]$ ).

## 4.5. Algoritmos meta-heurísticos de otimização

Algoritmos meta-heurísticos de otimização são capazes de explorar e refinar os resultados em um domínio pré-definido. São probabilísticos e, ao contrário dos métodos determinísticos, não estão sujeitos a encontrar apenas o ótimo local do problema. Por buscarem soluções aleatórias, conseguem encontrar os ótimos globais, ou seja, ponto de mínimo dentro todo o domínio estipulado.

### 4.5.1. Search Group Algorithm (SGA)

Código criado por pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o SGA teve como motivação o estudo de treliças (Gonçalves et al., 2015). Esse algoritmo é bastante novo se comparado com os usualmente utilizados mundialmente. Contudo, vem mostrando excelentes resultados. Pode-se descrever com simplicidade sua rotina de cálculo:

Passo (1) inicializar os parâmetros do algoritmo;

Passo (2) gerar a população inicial P;

Passo (3) criar o grupo inicial de pesquisa R selecionando os melhores indivíduos da população inicial, através de uma seleção por torneio;

Passo (4) substituir indivíduos por novas entradas geradas a partir daquelas substituídas;

Passo (5) construir as famílias de soluções com cada entrada do grupo de pesquisa R;

Passo (6) selecionar o novo grupo de pesquisa:

- Se  $k < itmax_{global}$ , forma-se um novo grupo de pesquisa R com os melhores membros de cada família.

- Caso contrário: o novo grupo de pesquisa R é formado pelos melhores  $n_g$  indivíduos da população.

Passo (7) atualizar  $\alpha_{k+1}$ ;

Passo (8) incrementar  $k = k+1$ , caso  $k \geq itmax$ , ir ao passo 9, senão retornar ao passo 4;

Passo (9) solução do problema será a primeira entrada do grupo de pesquisa R.

### 4.5.2. Firefly Algorithm (FA)

O *Firefly Algorithm* é outro algoritmo meta-heurístico de otimização. Proposto por (Xin-She Yang, 2009) é bastante utilizado em engenharia para otimização. Sua rotina é baseada no comportamento do piscar de vagalumes, e pode ser representada como segue:

Passo (1) determinar função objetivo:  $f(x)$ ,  $x=(x(1) , x(2) , x(3), \dots , x(n))$ ;

Passo (2) gerar a população inicial de vagalumes  $x(i)$ , sendo  $i=1,2,\dots,n$ ;

Passo (3) formular intensidade da luz ' $I(x)$ ' de modo que esteja associada com  $f(x)$  – por exemplo: para problemas de minimização,  $I(x) \propto f(x)$ , ou simplesmente  $I(x)=f(x)$ ;

Passo (4) definir coeficiente de absorção ' $\gamma$ ':

- Enquanto ( $t < \text{Iteração Máxima}$ )

- Para ' $i$ ' de 1 até ' $n$ ' (sendo ' $n$ ' todos os vagalumes)

- Para ' $j$ ' de 1 até ' $n$ ' (sendo ' $n$ ' todos os vagalumes)

- >Caso  $I(j) > I(i)$ , mover o vagalume ' $i$ ' em direção à ' $j$ ', avaliar novas soluções e intensidade de atualização da luz

- Fim do processo iterativo

Passo (5) classificar os vagalumes, de acordo com a intensidade, e encontrar o melhor atual;

Passo (6) pós processamento dos resultados e visualização

Passo (7) solução do problema será a resposta retornada pelo programa ( $f(x)$  para a maior intensidade de luz).

## 5. METODOLOGIA

### 5.1. Modelagem matemática das estruturas a serem analisadas (MATLAB)

A primeira etapa do trabalho foi a determinação das estruturas que posteriormente seriam analisadas. Dessa forma, duas estruturas distintas foram escolhidas (Bekdaş et al., 2011). Ambas as estruturas possuem 10 andares, porém, o segundo edifício (será chamado de Edifício B) possui parâmetros diferentes para cada andar. A Tabela 5.1 indica como os mesmos podem ser representados. Com estes dados, as matrizes [M], [K] e [C] foram construídas, para os dois casos. Já a Tabela 5.2 demonstra as frequências naturais dos edifícios, calculadas através do método de autovalores e autovetores.

Tabela 5.1 – Propriedades dos edifícios em estudo

Andar	Edifício A			Edifício B		
	m (ton)	k (MN/m)	c (MN s/m)	m (ton)	k (MN/m)	c (MN s/m)
1º	360	650	6,2	179	62,47	0,81
2º	360	650	6,2	170	52,26	0,67
3º	360	650	6,2	161	56,14	0,72
4º	360	650	6,2	152	53,02	0,68
5º	360	650	6,2	143	49,91	0,64
6º	360	650	6,2	134	46,79	0,60
7º	360	650	6,2	125	43,67	0,56
8º	360	650	6,2	116	40,55	0,52
9º	360	650	6,2	107	37,43	0,48
10º	360	650	6,2	98	34,31	0,44

Tabela 5.2 – Valores das Frequências Naturais dos edifícios utilizados

	Frequências Naturais (Hz)									
	1,01	3,01	4,94	6,76	8,43	9,91	11,18	12,19	12,92	13,37
Edifício A										
Edifício B	0,49	1,32	2,15	2,93	3,64	4,26	4,78	5,22	5,56	5,78

### 5.2. Verificação numérica após a adição de 1 AMS no topo

Após modelados matematicamente os edifícios em MATLAB, o primeiro passo foi a instalação de um único AMS no topo de cada estrutura. As configurações utilizadas, assim como os parâmetros de rigidez e amortecimento do AMS, foram escolhidas de acordo com (Miguel et al., 2013), para fins de verificação. A massa do AMS foi sempre mantida em 3% da massa total da estrutura. Uma vez verificada a rotina de cálculo (comparados os resultados de deslocamento máximo em cada um dos andares), a mesma pôde ser utilizada para os casos seguintes. Para o evento sísmico (ação externa ou excitação) é utilizado o sinal de excitação referente ao registro de aceleração do solo ocorrido em 1940, sob o *Imperial Valley*, no sudeste da Califórnia, denominado *El Centro*.

### 5.3. Excitações utilizadas

#### 5.3.1. Sismos reais

Como já dito, uma das excitações escolhidas foi o sismo denominado *El Centro* (sismo que atingiu um grau 6,9 na Escala Richter). A instalação do AMS deve garantir a redução dos deslocamentos máximos mesmo que sob excitações de natureza diferente; ou melhor, sismos que ainda não aconteceram e, portanto, não são conhecidos. A partir dessa premissa, outra excitação real registrada foi escolhida para a análise, o sismo de *Caucete*, ocorrido na província de San Juan (Argentina, 1977). Este último atingiu um grau 7,5 na Escala Richter. Os gráficos de aceleração (acelerogramas) utilizados podem ser observados na Figura 5.1.

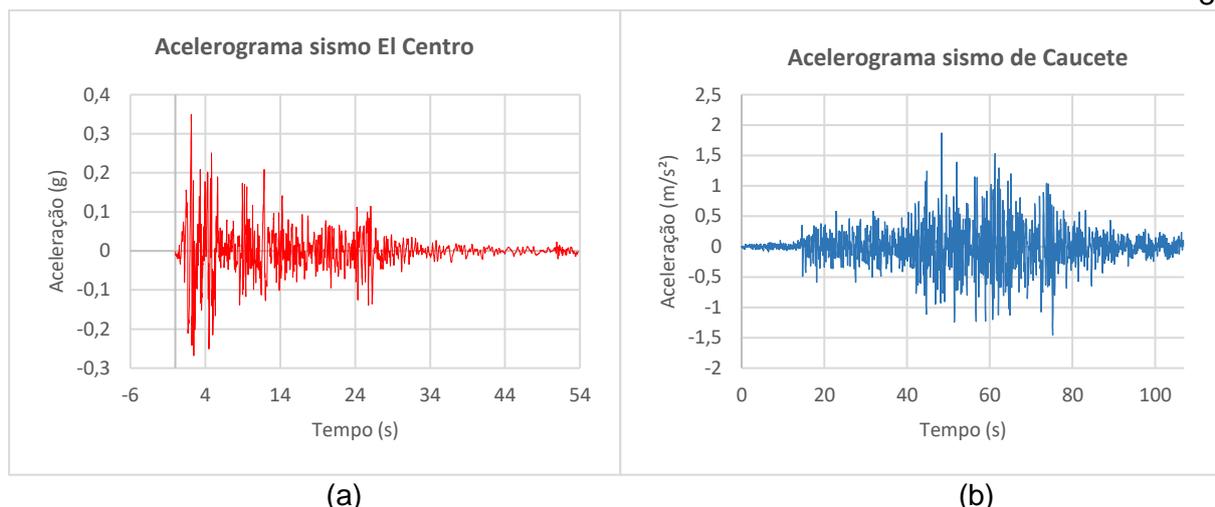


Figura 5.1 – Acelerograma do sismo El Centro (a) e do sismo de Cauçete (b).

### 5.3.2. Sismo artificial

#### 5.3.2.1. Geração do sinal artificial

Com o objetivo de confirmar a efetividade do AMS também em casos hipotéticos, um sinal artificial foi gerado - através do método proposto por *Kanai-Tajimi* - para ser posteriormente utilizado em ambas as estruturas. Foi utilizado o algoritmo proposto por (Shaan, P.S., 2014).

#### 5.3.2.2. Verificação numérica para o uso do sinal artificial

Os parâmetros de entrada, para geração do sinal artificial, foram escolhidos de acordo com (Mohebbi et al., 2012) e são descritos a seguir. Esses valores foram escolhidos com a finalidade de validação dos resultados. No trabalho citado, foi utilizada uma estrutura idêntica ao Edifício A, possibilitando a comparação entre os resultados de deslocamento. Apesar de existir uma aleatoriedade na geração de cada um dos sinais (ainda que mantendo os parâmetros de entrada), a diferença nos deslocamentos máximos não é significativa, de modo que foi possível a validação. Também é importante citar que, no presente trabalho, o objetivo não foi a análise em algum local específico. A Figura 5.2 indica o gráfico de acelerações gerado. As equações (5.1) indicam as propriedades de frequência do sinal a ser gerado. Em (5.2), as propriedades temporais. Em (5.3), a frequência natural do solo ( $\omega_g$ ), amortecimento do solo ( $\xi_g$ ) e pico de aceleração do solo (PGA).

$$f_{\min} = 0 \ ; \ f_{\max} = 25 \text{ Hz} \ ; \ df = 0,01 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

$$t_0 = 0 \ ; \ t_{\text{final}} = 50 \text{ s} \ ; \ dt = 0,02 \text{ s} \quad (5.2)$$

$$\omega_g = 37,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \ ; \ \xi_g = 0,3 \ ; \ \text{PGA} = 0,475g \quad (5.3)$$

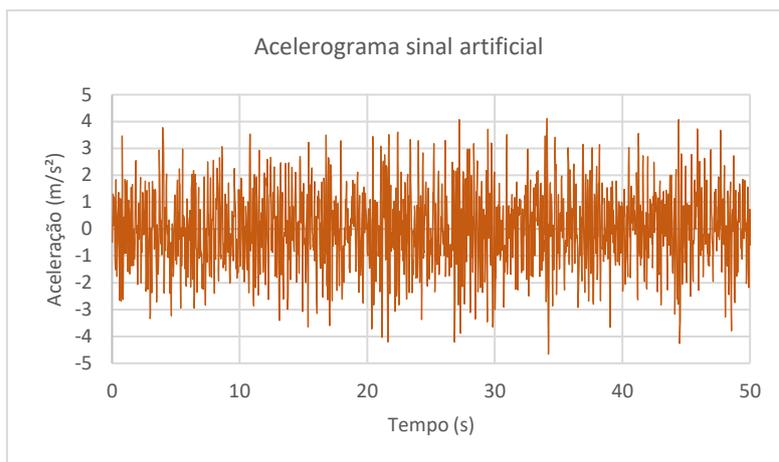


Figura 5.2 – Acelerograma do sinal artificial gerado pelo método de *Kanai-Tajimi*.

#### 5.4. Utilização de Múltiplos Amortecedores (MAMS)

Visando aumentar a gama de configurações disponíveis para o trabalho, optou-se por utilizar algumas distribuições com mais de um amortecedor simultaneamente atuando na estrutura. Foi analisado apenas o Edifício A nesta etapa, sob uma excitação real (*El Centro*) e a excitação artificial gerada anteriormente. A construção da matriz de rigidez [K] (para um caso genérico, podendo conter um ou mais amortecedores espalhados pelo edifício) é indicada na Figura 4.5. Analogamente, a matriz [C]. As massas de cada um dos amortecedores são adicionadas ao final da matriz [M] do edifício, sempre na diagonal.

##### 5.4.1. MAMS distribuídos horizontalmente no topo do Edifício A

A primeira configuração escolhida foi uma distribuição horizontal de 10 amortecedores, instalados exclusivamente no último andar do edifício. A soma das massas destes dispositivos ainda respeita a proporção de 3% da massa total da estrutura - 108t - de modo que cada um deles possui 0,3% - 10,8t. A validação do algoritmo foi feita a partir dos deslocamentos máximos resultantes, comparados com os obtidos por (Miguel et al., 2016).

##### 5.4.2. MAMS distribuídos verticalmente ao longo do Edifício A

Nesta etapa, a cada um dos andares foi adicionado um dos AMS. Novamente, a verificação do algoritmo é necessária. Os resultados de deslocamento máximo foram comparados aos obtidos por (Miguel et al., 2016), verificando o algoritmo. O uso de apenas 4 amortecedores efetivamente se justifica por ser a configuração ótima encontrada. Segundo (Miguel et al., 2016), o método utilizado de otimização tinha como base, primeiramente, 1 AMS instalado por andar (totalizando 10). Porém, 6 deles foram eliminados por não fazerem parte da solução ótima do problema. Desta forma, cada um dos AMS passou a ter uma massa de 27t (totalizando, em sua soma, 3% da massa total da estrutura).

#### 5.5. Otimização

Para a otimização dos parâmetros escolhidos em cada caso, foram utilizados tanto o algoritmo SGA quanto o FA (apenas como confirmação dos resultados). O objetivo da otimização foi a minimização dos deslocamentos obtidos no último andar, em todos os casos propostos. As variáveis consideradas foram exclusivamente a rigidez e o amortecimento do(s) amortecedor(es). Os algoritmos foram utilizados considerando o sismo *El Centro*. Dessa forma, pôde-se comprovar que parâmetros obtidos sob uma excitação qualquer irão reduzir deslocamentos também sob outras excitações aleatórias. A Figura 5.1 demonstra com uma visão geral o procedimento realizado.

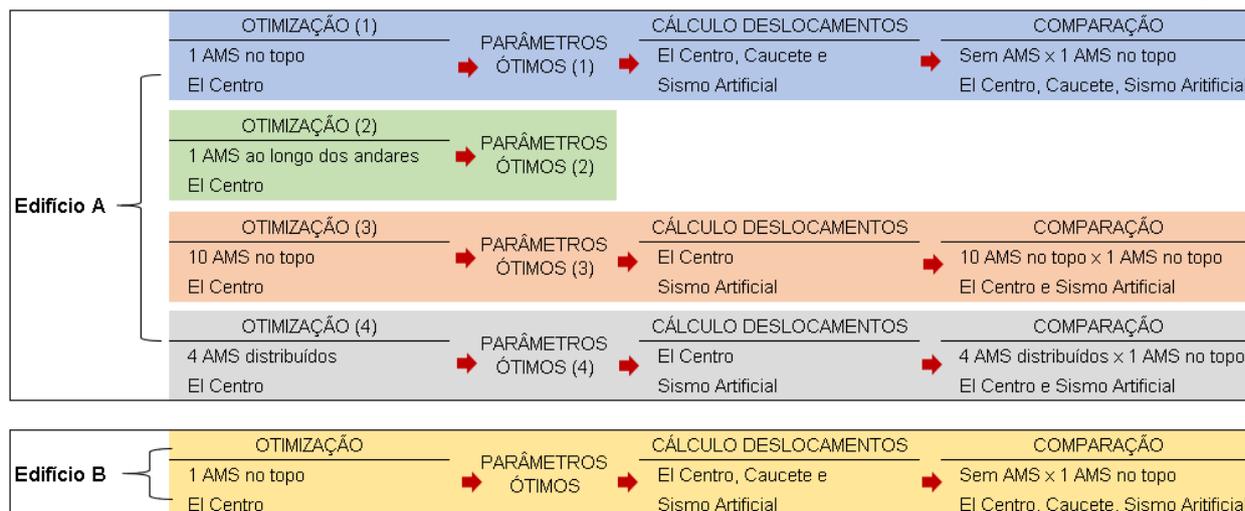


Figura 5.3 – Esquemática das otimizações realizadas

### 5.5.1. 1 AMS instalado

O procedimento de otimização foi realizado de forma a obter os valores de  $k_d$  (rigidez da mola que interliga o AMS à estrutura) e  $c_d$  (amortecimento do AMS) que minimizem o deslocamento máximo nas estruturas (último andar). A massa do AMS ( $m_d$ ) foi mantida em 3% do total e não foi considerada como uma variável de projeto.

Essa etapa foi repetida também se mudando a posição do AMS (que, inicialmente, estava no último andar).

### 5.5.2. 10 AMS instalados no topo do Edifício A

Para o caso com 10 AMS o processo torna-se mais complexo. Como cada amortecedor tem um  $k_d$  e  $c_d$  próprios, a otimização agora conta com 20 variáveis independentes. Todavia, o cálculo é muito semelhante ao anterior, e os algoritmos de otimização utilizados foram os mesmos. Estas simulações foram importantes, também, para demonstrar a funcionalidade da rotina de cálculo, mesmo em situações mais complexas. A massa de cada um dos AMS foi mantida em 10,8t.

### 5.5.3. 4 AMS dispostos no Edifício A

Para o caso com 4 amortecedores espalhados pelo edifício, o procedimento é análogo. Essa configuração contou com 8 variáveis para a otimização ( $k_d$  e  $c_d$  de cada um dos amortecedores). A massa de cada um deles foi mantida em 27t; sua disposição nos andares números 5, 7, 8 e 10.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Verificação dos Algoritmos

Primeiramente, o algoritmo de cálculo foi validado de acordo com (Miguel et al., 2013). Esse é o caso onde 1 único AMS foi instalado no topo dos edifícios. Além disso, a excitação utilizada foi o sismo *EI Centro*. Os resultados são demonstrados na Tabela 6.1. A diferença máxima obtida foi de 0,88%, validando o resultado.

Tabela 6.1 – Verificação do algoritmo para o caso com 1 AMS instalado no topo (sismo *El Centro*)

Andar	Deslocamento máximo [m]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	AMS
Edifício A	0,019	0,036	0,053	0,068	0,081	0,093	0,104	0,113	0,118	0,122	0,355
Miguel et al. (2013)	0,019	0,036	0,053	0,068	0,081	0,093	0,104	0,112	0,119	0,122	0,355
Edifício B	0,040	0,085	0,124	0,159	0,189	0,213	0,231	0,243	0,252	0,264	0,554
Miguel et al. (2013)	0,040	0,085	0,124	0,160	0,190	0,214	0,232	0,244	0,252	0,264	0,555

Para a verificação do sismo artificial gerado, foi comparado o resultado do deslocamento máximo em cada andar, no Edifício A, sem a instalação de AMS com os obtidos por (Mohebbi et al., 2012). Indicado na Tabela 6.2, a maior diferença foi de 3,6%. É importante lembrar que a excitação gerada não é exatamente igual, pela aleatoriedade do método (ângulo de fase aleatório), sendo esperada alguma diferença nos resultados (mesmo que muito pequena).

Tabela 6.2 – Verificação do algoritmo para o sinal artificial gerado, caso sem AMS

Andar	Deslocamento máximo [m]									
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º
Edifício A	0,022	0,043	0,062	0,079	0,094	0,107	0,118	0,126	0,132	0,135
Mohebbi et al., (2012)	0,022	0,043	0,063	0,080	0,095	0,108	0,119	0,129	0,136	0,140

Em continuidade, foi verificado o algoritmo para o caso com MAMS, de acordo com os resultados de (Miguel et al., 2016). Ambos os casos (10 amortecedores no topo e 4 amortecedores distribuídos no edifício) foram analisados, sob sismo *El Centro*. A diferença máxima não ultrapassou 0,1%, como mostra a Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Verificação do algoritmo para MAMS instalados (sismo *El Centro*)

Andar	Deslocamento máximo [m]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 AMS no topo	0,0186	0,0364	0,0529	0,0678	0,0811	0,0932	0,1037	0,1124	0,1184	0,1216
Miguel et al. (2016)	0,0186	0,0364	0,0528	0,0678	0,0810	0,0932	0,1036	0,1123	0,1184	0,1215
4 AMS distribuídos	0,0196	0,0381	0,0553	0,0707	0,0851	0,0978	0,1085	0,1167	0,1224	0,1256
Miguel et al. (2016)	0,0196	0,0381	0,0553	0,0707	0,0850	0,0978	0,1084	0,1167	0,1224	0,1255

## 6.2. Otimização dos Parâmetros

### 6.2.1. 1 AMS instalado

#### 6.2.1.1. Caso com 1 AMS no topo – Edifício A

Os algoritmos de otimização (SGA e FA) foram utilizados para a obtenção de  $k_d$  e  $c_d$  que minimizassem o deslocamento máximo no topo do edifício (sob o sismo *El Centro*). Os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resultado otimização do Edifício A, com 1 AMS no topo, sismo El Centro

		Número de Avaliações Utilizadas (Indivíduos x Iterações)				
		250	625	1250	2500	5000
SGA	kd [kN/m]	3519,948400	3366,302500	3266,961800	3297,285600	3266,235600
	cd [kNs/m]	72,376600	63,576100	56,829000	56,847300	56,783900
	Desl. Máx. [m]	<b>0,119400</b>	<b>0,119330</b>	<b>0,119310</b>	<b>0,119310</b>	<b>0,119310</b>
FA	kd [MN/m]	3535,050800	3541,996400	3503,625700	3447,906000	3381,472300
	cd [kNs/m]	73,565400	73,605400	71,373800	68,561000	64,370800
	Desl. Máx. [m]	<b>0,119430</b>	<b>0,119411</b>	<b>0,119380</b>	<b>0,119340</b>	<b>0,119330</b>

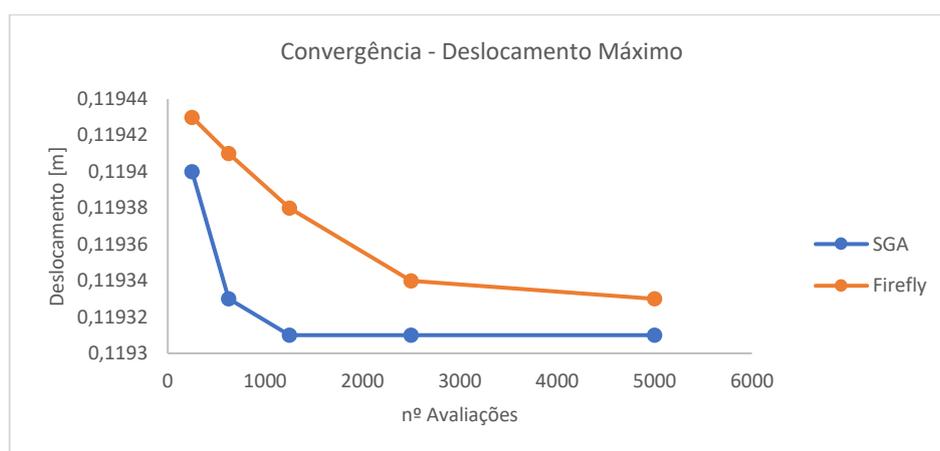


Figura 6.1 – Gráfico da convergência para o nº avaliações de cada algoritmo de otimização

Pode-se ver uma convergência bastante pronunciada, mesmo para poucas avaliações. Isso pode ser explicado pela simplicidade do problema (apenas 2 variáveis envolvidas). Além disso, os algoritmos chegaram em resultados muito próximos (aproximadamente 0,02% de diferença). A variação no valor dos parâmetros, mantendo o resultado de deslocamento muito próximo, demonstra apenas que o mínimo pode ser alcançado através de diversas combinações entre os parâmetros. Os valores ótimos obtidos pelo algoritmo SGA foram utilizados para as avaliações seguintes envolvendo o Edifício A (1 AMS no topo, sob o sismo de *Caucete* e o sinal artificial).

### 6.2.1.2. Caso com 1 AMS fora do topo – Edifício A

A mesma avaliação foi realizada variando-se a posição do AMS. Com o afastamento do último andar, a tendência foi o aumento do deslocamento máximo, mesmo utilizando os algoritmos de otimização e obtendo-se os parâmetros ótimos para cada uma das posições. A Tabela 6.5 demonstra os resultados das otimizações, quando o AMS é instalado nos diferentes andares do edifício. Para cada configuração, os parâmetros ótimos foram encontrados e o deslocamento, conseqüentemente, minimizado.

Tabela 6.5 – Resultados da otimização para 1 AMS fora do topo do Edifício A

Andar de instalação do AMS	1º	3º	7º	8º	9º	10º
kd [kN/m]	3239,3116	3293,0941	3254,5793	3487,6000	3478,9647	3266,2356
cd [kNs/m]	55,0703	58,8746	56,0614	70,5300	70,1402	56,7839
Desl. Máx. [m]	<b>0,1991</b>	<b>0,1649</b>	<b>0,1273</b>	<b>0,1224</b>	<b>0,1206</b>	<b>0,1193</b>

### 6.2.1.3. Caso com 1 AMS no topo – Edifício B

Analogamente ao realizado no subcapítulo anterior, foi realizado o procedimento de otimização para o Edifício B. Desta vez, predeterminado em 2500 avaliações (menor custo computacional e resultados muito próximos ao caso com 5000 avaliações). Na Tabela 6.6 é possível identificar os resultados da otimização. Os parâmetros ótimos foram obtidos, assim como o deslocamento mínimo (encontrado pelos dois algoritmos). Novamente, a divergência entre os algoritmos foi menor que 0,05%.

Tabela 6.6 - Resultado otimização do Edifício B, com 1 AMS no topo, sismo El Centro

SGA			FA		
kd [kN/m]	cd [kNs/m]	Desl. Máx. [m]	kd [MN/m]	cd [kNs/m]	Desl. Máx. [m]
124,4704684	13,93724189	<b>0,246667379</b>	122,0659049	15,17765668	<b>0,2467243</b>

## 6.2.2. MAMS instalados

### 6.2.2.1. Caso com 10 AMS instalados no topo - Edifício A

Nesta etapa, apenas o algoritmo SGA foi utilizado (já foi provado que os dois algoritmos fornecem resultados muito semelhantes). Os parâmetros obtidos (20 variáveis, 10 AMS diferentes) são indicados na Tabela 6.7. Nesta etapa, para a convergência dos resultados, foram utilizadas 6000 avaliações.

Tabela 6.7 – Parâmetros otimizados dos MAMS instalados no topo do Edifício A

AMS nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
kd [kN/m]	386,01	488,14	488,62	485,84	444,83	436,48	361,42	489,59	510,00	360,64
cd [kNs/m]	5,39	13,04	10,88	13,26	3,56	15,75	9,52	4,31	16,75	10,77

### 6.2.2.1. Caso com 4 AMS instalados - Edifício A

A Tabela 6.8 indica os resultados obtidos para esta configuração. Os amortecedores foram instalados nos andares 5, 7, 8 e 10.

Tabela 6.8 - Parâmetros otimizados dos MAMS instalados ao longo do Edifício A

AMS nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
kd [kN/m]	x	x	x	x	923,82	x	987,11	993,97	x	952,94
cd [kNs/m]	x	x	x	x	12,06	x	14,58	18,89	x	8,59

## 6.3. Comparação dos Resultados

### 6.3.1. Sem AMS x 1 AMS instalado no Topo com parâmetros otimizados

Os resultados demonstrados na Tabela 6.8 indicam que, para o caso com menor eficiência, o AMS conseguiu reduzir em 15,8% o deslocamento máximo no edifício. É importante observar que os parâmetros foram otimizados apenas para a simulação o sob o sismo *El Centro*. Dessa forma, é compreensível que, em casos aleatórios, a redução dos deslocamentos não seja tão expressiva. Ainda assim, no Edifício A, sob o sismo de Caucete (por exemplo), houve uma redução superior (41,16%).

Tabela 6.8 – Comparação dos resultados sem AMS x 1 AMS no topo.

		Deslocamento Máximo [m]		% Redução	
Edifício A	SGA	El Centro	0,1878	0,1193	<b>36,46%</b>
		Caucete	0,5560	0,3271	<b>41,16%</b>
		Sismo Artificial	0,1347	0,1131	<b>16,05%</b>
	FA	El Centro	0,1878	0,1193	36,46%
		Caucete	0,5560	0,3235	41,81%
		Sismo Artificial	0,1347	0,1044	22,49%
Edifício B	SGA	El Centro	0,3266	0,2467	<b>24,47%</b>
		Caucete	2,3358	1,9666	<b>15,81%</b>
		Sismo Artificial	0,5346	0,3589	<b>32,87%</b>
	FA	El Centro	0,3266	0,2467	24,45%
		Caucete	2,3358	1,9785	15,30%
		Sismo Artificial	0,5346	0,3643	31,85%
		SEM AMS	1 AMS no topo		

### 6.3.2. MAMS com parâmetros otimizados x 1 AMS no topo com parâmetros otimizados

As análises realizadas com a utilização de MAMS forneceram, em um dos casos, uma redução de 32,97%. Para os demais, os resultados foram ligeiramente inferiores, apesar de muito próximos. A Tabela 6.9 demonstra as reduções obtidas (referentes aos deslocamentos máximos) para os casos com MAMS em comparação aos casos sem amortecedores instalados.

Tabela 6.9 – Comparação dos resultados com a utilização de MAMS.

		Deslocamento Máximo [m]		% Redução
4 AMS distribuídos	El Centro	0,1236	0,1193	-3,50%
	Sismo Artificial	x	x	x
10 AMS topo	El Centro	0,1204	0,1193	-0,92%
	Sismo Artificial	0,0851	0,1131	<b>32,97%</b>
		MAMS	1 AMS topo	

## 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs uma abordagem análoga à existente na literatura citada para melhoria dos resultados envolvendo otimização de respostas dinâmicas em edifícios. A rotina desenvolvida mostrou-se satisfatória ao ser verificada em cada uma das etapas, apresentando diferenças máximas de 0,88% (comparação com (Miguel et al., 2013)), 0,1% ((Miguel et al, 2016), ao utilizar múltiplos amortecedores) e 3,6% (Mohebbi et al., 2012), mesmo havendo aleatoriedade no sinal gerado.

A utilização dos algoritmos de otimização demonstrou-se satisfatória. Os dois algoritmos utilizados (SGA e FA) apresentaram resultados muito próximos (diferença aproximada de 0,02%). O procedimento de otimização forneceu, ainda, resultados ligeiramente melhores (comparados com (Miguel et al., 2013)): aproximadamente 1,9% de redução dos deslocamentos (primeira estrutura) e 6,55% (segunda estrutura).

A análise principal, com apenas 1 AMS instalado no topo, revelou reduções significativas comparando-se às estruturas sem nenhum amortecedor. Em todos os casos, houve uma melhora de no mínimo 15%. Ainda que as estruturas estivessem sob excitações diferentes (e, ainda, uma excitação gerada artificialmente) o AMS teria capacidade de reduzir os deslocamentos máximos (com massa, rigidez e amortecimento pré-definidos). Quando tentou-se variar a posição do amortecedor, os resultados foram o aumento do deslocamento máximo (10º andar) à medida

que o dispositivo era afastado do topo. Concluiu-se que a melhor posição, de fato, para esta configuração, é no último andar.

O uso de MAMS revelou resultados interessantes. Em um dos casos (10 AMS instalados no topo do edifício), houve uma redução expressiva nos deslocamentos (aproximadamente 33%). Isso demonstra que, para o melhor custo-benefício do projeto, há uma grande gama de estudos a serem realizados. O presente estudo, apesar de muito simplório na análise considerando mais de um amortecedor, atingiu os objetivos: demonstrar a versatilidade dos algoritmos de otimização (trabalhar com até 20 variáveis), validar a rotina de cálculo mais complexa desenvolvida e demonstrar como esse aprofundamento pode (em alguns casos) ser promissor.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bekdas, G., Nigdeli, S. M., “**Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search.**” Eng Struct. vol. 33, p. 2716-23, 2011.

Fadel Miguel, L.F., Lopez, R.H., Miguel, L.F.F., Torii, A.J., “**A novel approach to the optimum design of MTMDs under seismic excitations.**” Structural Control and Health Monitoring. Online. DOI: 10.1002/stc.1845. 2016.

Fadel Miguel LF, Lopez RH, Miguel LFF., “**Discussion of paper: estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search.**” Engineering Structures, Vol 33, p. 2716–2723. 2013.

Gonçalves, M. S., Lopez, R. H, Miguel, L. F. F., “**Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures.**” Computers and Structures 153, p. 165-184. 2015.

Hadi, M. N. S., Arfiadi, Y., “**Optimum design of absorber for MDOF structures.**” J Struct Eng (ASCE), vol. 124, p. 1272-80, 1998.

Kanai, K., “**An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions.**” Bulletin Earthquake Research Institute, University of Tokyo, vol. 39, p. 85-95, 1961.

Kronbauer, F., “**Uso de amortecedores de massa sintonizados para a redução de vibrações em estruturas submetidas a eventos sísmicos.**” Monografia de trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2013.

Lee, C. L., Chen, Y. T., Chung, L. L., Wang, Y. P., “**Optimal design theories and applications of tuned mass dampers.**” Eng Struct, vol. 28, p. 43-53, 2006.

Mohebbi M, Shakeri K, Ghanbarpour Y, Majzoub H.; “**Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures.**” Journal of Vibration and Control 19(4): 605–625. 2013. DOI:10.1177/1077546311434520.

Paredes, M.M., “**Utilização de amortecedores de massa sintonizadas no controlo de vibrações em estruturas.**” Dissertação, Universidade do Porto, 2018.

Rossato, L.V., “**Otimização de amortecedores de massa sintonizados em estruturas submetidas a um processo estacionário.**” Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, 2017.

Shaan, P.S., “**Geração de excitação sísmica através do espectro de Kanai-Tajimi.**” Monografia de trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2014.

Yang, X. S., “**Firefly algorithms for multimodal optimization. Stochastic Algorithms: Foundations and Applications.**” SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Sciences, vol. 5792, p. 169-178, 2009.