

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

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE DE VIBRAÇÃO PARA ESTRUTURAS
SUBMETIDAS A EXCITAÇÕES SÍSMICAS
por

Fiona Valentine Hildegarde Luci

Trabalho de Conclusão de Curso em
Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, Novembro de 2021

Fiona Valentine Hildegard Lucy

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE DE VIBRAÇÃO PARA ESTRUTURAS
SUBMETIDAS A EXCITAÇÕES SÍSMICAS

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: **Profa. Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel**

Comissão de Avaliação:

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Prof^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Porto Alegre, Novembro de 2021

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT Agência Brasileira de Normas Técnicas

ADS Atenuador Dinâmico Sincronizado

AISC *American Institute of Steel Construction*

ANSI *American National Standards Institute*

GDL Grau de Liberdade

FFT *Fast Fourier Transform*

MADS Múltiplos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados

MGDL Múltiplos Graus de Liberdade

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

PGA *Peak Ground Acceleration*

WOA *Whale Optimization Algorithm*

Resumo

LUCI, F.V.H. **Otimização de sistemas de controle de vibração para estruturas submetidas a excitações sísmicas.** 2021, 27 páginas, Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Os terremotos causam vibrações no solo que podem danificar gravemente as estruturas e, às vezes, até levar ao seu colapso. Nesse cenário, o controle estrutural é uma ferramenta capaz de reduzir as amplitudes de vibração da estrutura. Em particular, o sistema de controle passivo por meio de Atenuador Dinâmico Sincronizado (ADS) é uma técnica bastante utilizada. O objetivo deste trabalho é criar um código Matlab capaz de otimizar a quantidade desses dispositivos, seu posicionamento e seus parâmetros para reduzir o deslocamento máximo dos andares. Para isso, estuda-se um edifício submetido a um registro da aceleração de um sismo real e um sismo artificial gerado segundo o espectro de Kanai-Tajimi com frequência principal de excitação coincidente com a frequência do primeiro modo fundamental do edifício. Vários cenários de controle foram propostos para realizar as otimizações, utilizando o algoritmo meta-heurístico *Whale Optimization Algorithm* (WOA). O cenário que mais reduziu a movimentação do último andar foi a utilização de 10 ADSs, um em cada andar. Mas o uso de um único ADS também tem resultados relevantes e seu uso seria mais econômico do que o de 10 ADSs.

PALAVRAS-CHAVE: Atenuador Dinâmico Sincronizado, Sismos, Algoritmo meta-heurístico *Whale Optimization Algorithm*, Controle de vibrações.

Abstract

LUCI, F.V.H. Optimization of vibration control systems for structures subjected to seismic excitations. 2021, 27 pages, Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre

Earthquakes cause ground vibrations that can severely damage structures and sometimes even lead to their collapse. In this scenario, structural control is a tool capable of reducing the structure's vibration amplitudes. In particular, the passive control system through Synchronized Dynamic Attenuator (ADS) is a widely used technique. The objective of this work is to create a Matlab code capable of optimizing the quantity of these devices, their positioning and their parameters in order to reduce the maximum displacement of the floors. For this, a building submitted to a register of the acceleration of a real earthquake and an artificial earthquake generated according to the Kanai-Tajimi spectrum with excitation principal frequency coincident with the frequency of the building's first fundamental mode is studied. Several control scenarios were proposed to perform the optimizations, using the meta-heuristic Whale Optimization Algorithm (WOA). The scenario that most reduced the movement of the top floor was the use of 10 ADSs on each floor. However the use of a single ADS also has relevant results and its use would be more economical than that of 10 ADS.

KEYWORDS: Synchronized Dynamic Attenuator, Earthquakes, Meta-heuristic algorithm Whale Optimization Algorithm, Vibration control.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. Sismo	8
2.2. Sismo artificial.....	8
2.3. Equação de um sistema de massa, mola e amortecimento com n GDL	9
2.4. Método de Newmark	9
2.5. Sistema passivo ADS.....	10
2.6. Equação com um ADS e MADS	11
2.6.1. Algoritmo meta-heurístico.....	12
2.6.2. <i>Whale Optimization Algorithm</i> WOA	12
3. CASO DE ESTUDO	13
3.1. Validação do programa de integração numérica pelo método de Newmark	13
3.2. Aplicação do algoritmo de Newmark em um modelo de prédio	13
3.3. Um único ADS no topo	14
3.3.1. Parâmetros da literatura	14
3.3.2. Otimização dos parâmetros do um ADS no topo	15
3.4. Sismo artificial.....	16
3.4.1. Verificação do algoritmo de geração de sismo artificial	16
3.4.2. Geração do pior sismo para a estrutura estuda	17
3.5. MADS.....	18
3.5.1. Posição e parâmetros da literatura	18
3.5.2 Otimização dos parâmetros dos 6 ADS verticais e localização fixa	19
3.5.3 Otimização da localização dos MADS	19
3.5.4 Otimização de 10 ADSs verticais com massa fixa	20
3. CONCLUSÃO.....	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
APÊNDICES	24

1. INTRODUÇÃO

Os edifícios estão sujeitos a várias excitações, como os terremotos, que são vibrações do solo resultantes da súbita liberação de energia acumulada pelas tensões exercidas nas rochas. Essa liberação de energia gera vibrações no solo que se propagam em todas as direções na forma de ondas sísmicas e atingem a superfície. A ocorrência de um terremoto gera vibrações na fundação das estruturas, fazendo-as vibrar. Se a frequência natural do edifício e a frequência de excitação do terremoto coincidirem, tem-se o que é chamado de ressonância da estrutura. Se a estrutura não tiver sido dimensionada para suportar essa situação, ela pode ser gravemente danificada e desabar. A excitação de um terremoto depende do tipo de solo e, portanto, a frequência de excitação pode ser prevista por meio de estudos geotécnicos do solo.

Existem muitos padrões de cálculo que indicam as regras de dimensionamento a serem seguidas, como por exemplo, a norma brasileira NBR 15421 (ABNT, 2006), o regulamento colombiano NSR-10 (MAVDT, 2010) e o EUROCODE 8-Parte 1 (ECS, 2010). Os critérios de dimensionamento mais utilizados são o deslocamento relativo entre os andares, comumente chamado de *story drift*, o deslocamento do último andar, o deslocamento de cada andar, etc.

Quando um edifício é submetido à ação sísmica e apresenta valores de *story drift* que ultrapassam os limites permitidos, várias soluções podem ser aplicadas. É possível modificar as escolhas de concepção da estrutura para deslocar sua frequência natural. Também é possível implementar um sistema de controle de vibrações. Dentre os vários tipos de sistemas de controle de vibrações disponíveis, destacam-se os sistemas passivo e ativo. O sistema passivo não tem necessidade de energia externa para funcionar. Por outro lado, o sistema ativo vem aplicar uma força sobre o edifício e para isso é necessário uma fonte de energia para funcionar. Existem inclusive os sistemas híbridos, que combinam as características dos sistemas ativo e passivo.

Em particular, MIGUEL et al. (2018) comentam que o sistema passivo é muito útil para mitigar riscos naturais e melhorar a segurança e manutenção dos sistemas estruturais. Além disso, ele não precisa de energia externa, sendo assim mais barato, mais fácil de instalar, necessita de pouca manutenção e nenhuma vigilância. Segundo ÁVILA (2002) um dos dispositivos passivos mais tradicionais é o Atenuador Dinâmico Sincronizado (ADS), o qual é formado por uma massa, uma mola e um amortecedor viscoso. Os parâmetros deste dispositivo são geralmente escolhidos para que sua frequência própria corresponda à frequência própria da excitação. Desta forma a estrutura global vibra, o ADS entra em ressonância e dissipa a energia vibratória da excitação.

Na literatura encontram-se vários exemplos de estruturas que utilizam esse tipo de sistema para se proteger do vento ou de sismos. Algumas aplicações são: a Torre C N de 553m de altura, localizada em Toronto, Canadá; a John Hancock Tower com 244m de altura, situada em Boston, Estados Unidos (ELIAS; MATSAGAR, 2017).

Quando se quer colocar um único ADS em um edifício, normalmente ele é posicionado no topo da estrutura e é ajustado em torno do modo fundamental da estrutura. No entanto, este dispositivo não protege o edifício de modos superiores. Assim, a solução é aplicar vários ADS (MADS) e ajustá-los aos diferentes modos que se desejam atenuar.

O objetivo geral desse trabalho é realizar a otimização de parâmetros de projeto (massa, mola e amortecimento) e posições de Atenuadores Dinâmicos Sincronizados (ADS) utilizados como sistema de controle de vibrações em edifícios submetidos à excitação sísmica, a fim de determinar para o edifício estudado, o melhor cenário de controle que corresponde à adequação da estrutura ao critério imposto de deslocamento máximo dos andares.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sismo

Os terremotos são tremores de solo resultantes da liberação repentina de energia acumulada pelo estresse exercido nas rochas. Essa liberação de energia gera vibrações no solo que se propagam em todas as direções na forma de ondas sísmicas e atingem a superfície. O sismo gera aceleração no solo, a qual é registrada por meio dos sismógrafos. Esse registro é denominado acelerograma e representa a variação da aceleração ao longo do tempo. O sismo possui três componentes ortogonais entre si, sendo duas horizontais (Norte-Sul e Leste-Oeste) e uma vertical, para as quais as grandezas mais importantes são a duração, a amplitude e o conteúdo de frequências do evento (PEÑA, 2012). Existem vários bancos de dados de registro de acelerogramas de terremotos. Neste trabalho, o acelerograma do componente Norte-Sul do terremoto El Centro (1940) será estudado. Ele pode ser encontrado em: <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>.

2.2. Sismo artificial

A criação de um terremoto artificial permite ajustar os parâmetros de um terremoto de forma personalizada, como por exemplo, coincidir a frequência do solo (escolhida durante a geração do terremoto) com a frequência natural do edifício e, portanto, estudar o “piores sismo” para tal estrutura. Um código Matlab foi desenvolvido para gerar um acelerograma artificial de terremotos a partir do espectro Kanai-Tajimi (KANAI, 1961; TAJIMI, 1960). A aceleração do solo é modelada como um processo aleatório estacionário. O espectro de excitação sísmica é calculado a partir de uma equação empírica baseada em um ruído branco gaussiano que usa como parâmetros de entrada a frequência natural do solo ω_g , o amortecimento do solo ξ_g , o passo de frequência do sinal $\Delta\omega$ e a faixa de frequência do sinal. A equação que descreve este modelo é dada pela função de densidade espectral de potencial $S(\omega)$ onde S_0 é a densidade espectral constante:

$$S(\omega) = S_0 \left(\frac{\omega_g + 4\omega_g^2 \xi_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\omega_g^2 \xi_g^2 \omega^2} \right), \text{ com } S_0 = \frac{0,03\xi_g}{\pi\omega_g(4\xi_g^2 + 1)} \quad (1)$$

Para passar esta função no domínio do tempo e assim obter um acelerograma em função do tempo, utiliza-se a equação proposta pelo método de SHINOZUKA e JAN (1972) em que utiliza-se uma série de funções cossenos, frequências com espaçamentos diferentes e ângulos de fase aleatórios ϕ_j . Os valores de ϕ_j são escolhidos aleatoriamente seguindo uma distribuição uniforme entre 0 e 2π .

$$\vec{w}_g(t) = \sqrt{2} \sum_{j=1}^{N_\omega} \sqrt{S(\omega_j)\Delta\omega} \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (2)$$

Na equação (2), N_ω representa o número de intervalos da banda de frequência. Portanto, está diretamente vinculado à faixa de frequência escolhida e ao intervalo de frequência usado $\Delta\omega$. O sinal é gerado no domínio do tempo, é necessário normalizar o acelerograma para que o PGA (*Peak Ground Acceleration*) do terremoto esteja de acordo com as características do solo da região de estudo. A aceleração normalizada será igual a:

$$\overrightarrow{u_{g \text{ norm}}}(t) = \frac{\overrightarrow{\ddot{u}_g}(t)}{\max(\text{abs}(\overrightarrow{\ddot{u}_g}(t)))} \times \text{PGA} \quad (3)$$

O PGA corresponde à aceleração máxima do solo (*Peak Ground Acceleration*) e é um parâmetro que caracteriza o movimento de solos sujeitos a ondas sísmicas. Está relacionado à velocidade do movimento do solo durante um terremoto. Este parâmetro depende da intensidade do terremoto, mas também da natureza geológica do subsolo. O PGA é expresso como uma porcentagem de g (% g), onde g é a aceleração da gravidade.

2.3. Equação de um sistema de massa, mola e amortecimento com n GDL

A equação de um *shear building* com vários graus de liberdade (Figura 1) e submetido a um sismo pode se escrever da forma seguinte:

$$[M] \overrightarrow{\ddot{u}}(t) + [C] \overrightarrow{\dot{u}}(t) + [K] \overrightarrow{u}(t) = -[M] \overrightarrow{\ddot{x}_g}(t) \quad (4)$$

Onde $[M]$, $[K]$ e $[C]$ são as matrizes de massa, rigidez e amortecimento, $\overrightarrow{\ddot{u}}(t)$ é o vetor aceleração, $\overrightarrow{\dot{u}}(t)$ o vetor velocidade, $\overrightarrow{u}(t)$ o vetor deslocamento e $\overrightarrow{\ddot{x}_g}(t)$ o vetor que representa a aceleração na base da estrutura. As matrizes $[M]$ e $[K]$ para um sistema em série com n graus de liberdade são dadas pela equação (5). A matriz $[C]$ é construída da mesma forma que a matriz $[K]$.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

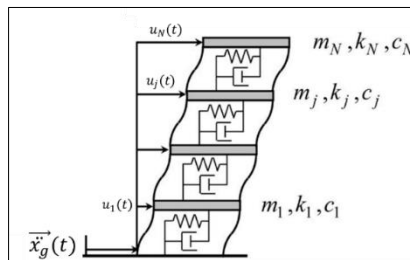


Figura 1: Modelo de um *Shear Building* com n graus de liberdade.

2.4. Método de Newmark

Para resolver as equações de movimento de um sistema com vários graus de liberdade, é comum o uso de métodos de integração numérica. Esses métodos permitem que a equação de movimento seja resolvida em intervalos de tempo discretos Δt , enquanto permite uma pequena variação no deslocamento, velocidade e aceleração para cada intervalo de tempo Δt .

Na literatura, existem vários métodos numéricos. Neste trabalho será utilizado o método de Newmark (NEWMARK 1959) programado em Matlab. Este método é do tipo implícito e baseia-se no fato de que a aceleração varia linearmente em um intervalo de tempo Δt . O deslocamento e a velocidade em $t = 0$ são conhecidos, a aceleração em $t = 0$ é calculada usando a seguinte equação:

$$\vec{\ddot{u}}(t_0) = \mathbf{M}^{-1}[\vec{F}(t_0) - \mathbf{C}\vec{\dot{u}}(t_0) - \mathbf{K}\vec{u}(t_0)] \quad (6)$$

As seguintes expressões permitem calcular o deslocamento, a velocidade e a aceleração em cada intervalo de tempo:

$$\vec{u}(t_{j+1}) = \mathbf{D}\{\vec{F}(t_{j+1}) + \mathbf{M}[a_0\vec{u}(t_j) + a_1\vec{\dot{u}}(t_j) + a_2\vec{\ddot{u}}(t_j)] + \mathbf{C}[a_3\vec{u}(t_j) + a_4\vec{\dot{u}}(t_j) + a_5\vec{\ddot{u}}(t_j)]\} \quad (7)$$

Com \mathbf{D} , a velocidade e a aceleração dadas pelas equações (8), (9) et (10), respectivamente.

$$\mathbf{D} = (a_0\mathbf{M} + a_3\mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \quad (8)$$

$$\vec{\dot{u}}(t_{j+1}) = a_3 [\vec{u}(t_{j+1}) - \vec{u}(t_j)] - a_4\vec{\dot{u}}(t_j) - a_5\vec{\ddot{u}}(t_j) \quad (9)$$

$$\vec{\ddot{u}}(t_{j+1}) = a_0 [\vec{u}(t_{j+1}) - \vec{u}(t_j)] - a_1\vec{\dot{u}}(t_j) - a_2\vec{\ddot{u}}(t_j) \quad (10)$$

E também as seguintes constantes:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2} ; a_1 = \frac{1}{\alpha\Delta t} ; a_2 = \frac{1}{2\alpha} - 1 ; a_3 = \frac{\beta}{\alpha\Delta t} ; a_4 = \frac{\beta}{\alpha\Delta t} - 1 ; a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right] \quad (11)$$

Os parâmetros α e β presentes nos coeficientes das equações indicam o peso da aceleração nas equações de velocidade e deslocamento no final do intervalo Δt . Esses parâmetros podem ser escolhidos de forma a obter a precisão e a estabilidade desejadas. Na literatura normalmente são adotados os seguintes valores: $\alpha = 0,25$ e $\beta = 0,50$.

2.5. Sistema passivo ADS

O sistema de controle passivo de vibração envolve a instalação de um ou mais dispositivos na estrutura para absorver parte da energia da excitação. Existem vários exemplos de sistemas passivos: atenuadores dinâmicos sincronizados (ADS), amortecedores regulados por líquido (ALS) e amortecedores de fricção (ROSSATO et al., 2017).

Este trabalho foca no uso de atenuadores dinâmicos sincronizados. Os ADSs não precisam de nenhuma energia externa para funcionar e usam o movimento da estrutura para desenvolver as forças de controle. Esses dispositivos mecânicos são eficientes, baratos e requerem pouca manutenção. O ADS clássico consiste em um sistema massa-mola-amortecedor.

Para controlar as vibrações em edifícios que utilizam apenas um único ADS, o dispositivo é normalmente instalado no topo do edifício e sua frequência é ajustada em torno da frequência do primeiro modo de vibração da estrutura, que é o modo predominante. BRANDÃO (2021), VELLAR et al. (2019), MIGUEL et al. (2016) e LEE et al. (2006) preconizam fixar o valor da massa do ADS em 3% da massa total da estrutura. De acordo com VELLAR et al. (2019), no entanto, o uso de um único ADS pode ter um desempenho ruim face aos modos superiores. A

solução é então recorrer a vários ADSs para controlar os modos superiores da estrutura. Porém, determinar os parâmetros ótimos dos dispositivos, bem como a quantidade a instalar e a melhor posição na estrutura, não é um problema simples.

Um exemplo bem conhecido do uso de ADS em edifícios é o edifício Taipei 101, com 508 m de altura e 101 andares, localizado em Taipei, Taiwan. Este edifício está equipado com um ADS único capaz de reduzir as oscilações induzidas por ventos fortes ou terremotos. Este ADS tem massa de 660 toneladas, é suspenso por longos cabos para formar um pêndulo.

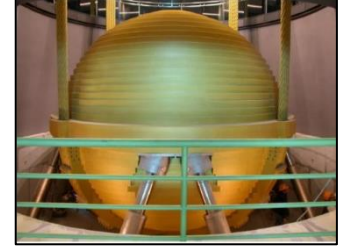


Figura 2: ADS do edifício Taipei 101 em Taiwan

2.6. Equação com um ADS e MADS

Para levar em consideração a instalação de um ADS no topo da estrutura na equação do movimento Equação (4), as matrizes de massa e rigidez da estrutura em questão devem ser modificadas de acordo com a Equação(12). A construção da matriz de amortecimento segue a mesma lógica que a matriz de rigidez, portanto não será apresentada aqui. Um diagrama da estrutura de n andares com um único ADS no topo é mostrado na esquerda.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_{ADS} \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_n + k_{ADS} & -k_{ADS} \\ 0 & 0 & \dots & -k_{ADS} & k_{ADS} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para o caso de uma estrutura composta por vários ADSs (como por exemplo, o caso de um ADS por andar), as matrizes de massa e rigidez são construídas de acordo com a equação (13). A construção da matriz de amortecimento segue a mesma lógica da matriz de rigidez, portanto não será apresentada aqui. Um diagrama da estrutura de n andares com um ADS por andar é mostrado na Figura 3, à direita.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_{ADS1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & m_{ADS2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & m_{ADSn} \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_{ADS1} & -k_2 & \dots & 0 & -k_{ADS1} & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 + k_{ADS2} & \dots & 0 & 0 & -k_{ADS2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_n + k_{ADSn} & 0 & 0 & \dots & -k_{ADSn} \\ -k_{ADS1} & 0 & \dots & 0 & k_{ADS1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -k_{ADS2} & \dots & 0 & 0 & k_{ADS2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -k_{ADSn} & 0 & 0 & \dots & k_{ADSn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

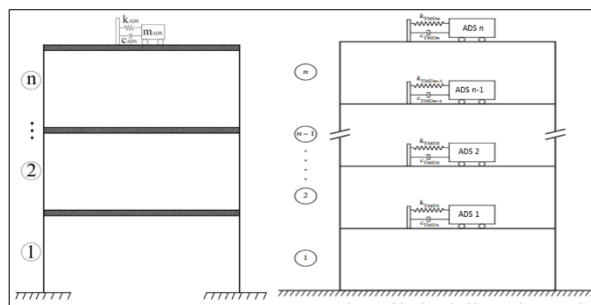


Figura 3: Modelo do shear building com um ADS no topo (a esquerda) e um ADS a cada andar (a direita)

Matematicamente, a otimização consiste em encontrar as variáveis de entrada que permitem que uma função seja minimizada ou maximizada. A função a ser otimizada é chamada de função objetivo. As variáveis a serem otimizadas podem estar sujeitas a restrições e também podem ser relacionadas por várias equações. Os algoritmos de otimização podem ser classificados em duas categorias: os algoritmos determinísticos, baseados no cálculo do gradiente da função objetivo, e os algoritmos estocásticos, dos quais fazem parte os meta-heurísticos, que consiste na utilização de métodos probabilísticos e não são baseados no gradiente. O objetivo deste trabalho será otimizar as posições e o número de ADSs instalados em um edifício, bem como seus parâmetros m , k e c . A função objetivo a minimizar será o deslocamento máximo de cada andar.

2.6.1. Algoritmo meta-heurístico

Algoritmos meta-heurísticos é uma classe de algoritmos que não dependem do cálculo do gradiente da função objetivo para resolver o problema de otimização dado. Os algoritmos meta-heurísticos são baseados em dois princípios básicos: a randomização das variáveis a serem otimizadas e a seleção das melhores soluções. A randomização evita que as soluções fiquem presas em ótimos locais e, ao mesmo tempo, aumenta a diversidade de soluções. A seleção garante que as soluções convergirão para um ótimo.

A principal vantagem dos algoritmos meta-heurísticos é a aplicação em funções onde o gradiente é difícil de obter ou simplesmente inexistente, como por exemplo funções não lineares ou descontínuas. Eles também fornecem um conjunto de soluções ótimas em vez de uma única solução, o que evita ficar bloqueado em ótimos locais. Muitos algoritmos meta-heurísticos são bioinspirados, ou seja, foram desenvolvidos a partir da observação de um fenômeno natural ou do comportamento de seres vivos. Encontra-se, por exemplo: o algoritmo genético (AG), inspirado nos princípios da teoria da seleção natural de Darwin (HOLLAND, 1975); o Firefly Algorithm (FA), inspirado no comportamento pisca-pisca de vaga-lumes (YANG, 2008) e o *Whale Optimization Algorithm* (WOA), que descreve o comportamento de caça de baleias jubarte (MIRJALILI; LEWIS, 2016), que será utilizado neste trabalho.

2.6.2. *Whale Optimization Algorithm* WOA

Neste trabalho, as otimizações são realizadas utilizando o *Whale Optimization Algorithm* (WOA), desenvolvido por MIRJALILI e LEWIS (2016). O WOA simula o comportamento de caça de baleias jubarte. As baleias procuram suas presas ao acaso e, depois de encontrá-las, atacam criando uma estrutura de bolhas em forma de espiral. Tal como acontece com outros algoritmos baseados em população, WOA usa uma população de agentes de pesquisa (baleias) para determinar o ótimo geral do problema. O processo de pesquisa começa com a criação de um conjunto de soluções aleatórias (soluções candidatas), então, através de seus três operadores, essas soluções são aprimoradas e o processo é repetido até que um critério de parada seja atingido. O algoritmo das baleias não foi particularmente programado durante este trabalho. O código Matlab de acesso gratuito de MIRJALILI e LEWIS (2016) foi usado e adaptado. Os princípios matemáticos deste algoritmo não serão detalhados neste relatório.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Validação do programa de integração numérica pelo método de Newmark

Para validar o algoritmo do método de Newmark, foi utilizado um sistema de massa-mola-amortecedor com 4 graus de liberdade sujeito a forças harmônicas e condições iniciais diferentes de zero. Este é um exercício proposto nas notas de Aula de Vibrações da Professora Letícia Fleck Fadel Miguel (UFRGS, 2006). Assim, os resultados obtidos pelo algoritmo de Newmark são comparados com os resultados do curso utilizando o mesmo método e depois com o método de resolução analítica. O sistema estudado e os parâmetros são apresentados no Apêndice 1.

No algoritmo de Newmark, escolheu-se: $\alpha = 0,25$ e $\beta = 0,5$. Esses valores serão mantidos posteriormente para todas as simulações. Considerou-se um intervalo de tempo $\Delta t = 0,005s$. Procura-se para cada massa: o deslocamento, a velocidade e a aceleração em $t = 5s$. As condições iniciais são dadas pelos vetores $x(0)$ e $\dot{x}(0)$. A Tabela 1 mostra o deslocamento, a velocidade e a aceleração em $t = 5s$ para o algoritmo de Newmark desse estudo, os resultados da Aula de Vibrações com o algoritmo de Newmark e o método analítico programado nesse estudo.

Tabela 1: Deslocamento, velocidade e aceleração em $t = 5s$ para o algoritmo de Newmark, os resultados da Aula de Vibrações e o método analítico.

Mas sa	$x(5) m$			$\dot{x}(5) m/s$			$\ddot{x}(5) m/s^2$		
	New- mark	Aula	Analítico	New- mark	Aula	Analítico	New- mark	Aula	Analítico
1	-0,5160	-0,5160	-0,51602	0,4122	0,4122	0,4124	12,9008	12,9008	12,9005
2	-0,0438	-0,0438	-0,04378	-0,4432	-0,4432	-0,4434	1,0940	1,0940	1,0945
3	-0,7968	-0,7968	-0,7969	-0,9472	-0,9472	-0,9470	19,9221	19,9221	19,9219
4	0,4334	0,4334	-0,4335	0,7742	0,7742	0,7741	-10,8369	-10,8369	-10,8373

Arredondando para a dezena de milésimo mais próxima, o método de Newmark e os resultados do curso são exatamente os mesmos. Isso é o que se esperava já que os resultados do curso foram obtidos com o mesmo método e os mesmos parâmetros. Além disso, os resultados estão muito próximos do método analítico de resolução. A Figura 4 mostra que as curvas de deslocamento ao longo do tempo de cada método se sobrepõem quase perfeitamente. Pode-se, portanto, considerar que o algoritmo de Newmark programado está validado. Os seguintes parâmetros serão mantidos posteriormente: $\alpha = 0,25$ e $\beta = 0,5$. O intervalo de tempo Δt será posteriormente ajustado com o intervalo de tempo do registro do terremoto El Centro. O Apêndice 2 mostra o deslocamento, a velocidade e a aceleração das 4 massas ao longo do tempo, respectivamente para o método de Newmark e para o método analítico.

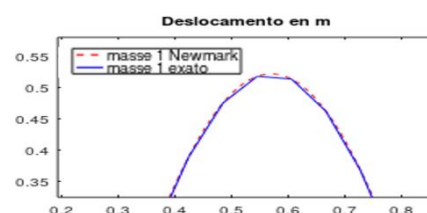


Figura 4: Superposição das curvas de deslocamento da massa 1 para o algoritmo de Newmark e o método exato.

3.2. Aplicação do algoritmo de Newmark em um modelo de prédio

Em seguida, o algoritmo de Newmark foi aplicado ao mesmo sistema usado por LEE et al. (2006), BEKDAS e NIGDELI (2011), e MIGUEL et al. (2016). Trata-se de um modelo estrutural do tipo “*shear building*” com 10 andares (10 graus de liberdade) modelando um edifício típico de média dimensão onde todos os andares têm a mesma massa ($m = 360 t$), o mesmo coeficiente de amortecimento ($c = 6,2 MNs/m$) e a mesma rigidez ($k = 650 MN/m$). Foi assumido também que o material apresenta comportamento linear. Para o restante deste trabalho, este edifício será utilizado para todas as simulações. Por enquanto, o edifício é considerado sem ADS.

O sistema será submetido à mesma excitação de MIGUEL et al. (2016), ou seja, o componente Norte-Sul do terremoto El Centro (1940). O registro do terremoto é mostrado em Figura 5. O terremoto foi registrado com um intervalo de tempo de 0,02 s. Em seguida, o mesmo intervalo de tempo $\Delta t = 0,02$ s será utilizado para todas as simulações, como proposto por MIGUEL et al. (2013). Os resultados do deslocamento máximo de cada andar são comparados com os de MIGUEL et al. (2016). Os resultados dos deslocamento de MIGUEL et al. (2016) e do presente estudo são idênticos. O algoritmo Newmark aplicado ao edifício é validado.

Tabela 2: Deslocamento máximo de cada andar para a estrutura sem ADS

Andar	Deslocamento (m)	
	MIGUEL et al.(2016)	Presente estudo
1	0,0304	0,0304
2	0,0595	0,0595
3	0,0865	0,0865
4	0,1111	0,1111
5	0,1327	0,1327
6	0,1509	0,1509
7	0,1656	0,1656
8	0,1766	0,1766
9	0,1840	0,1840
10	0,1877	0,1877

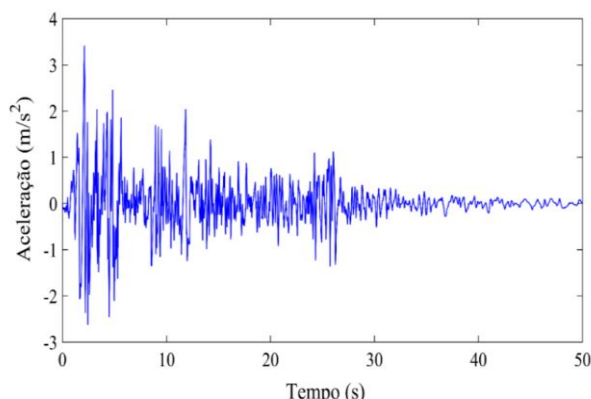


Figura 5: Acelerograma do sismo EL Centro NS

3.3. Um único ADS no topo

3.3.1. Parâmetros da literatura

O programa desenvolvido para a análise dinâmica foi modificado para levar em consideração um sistema de controle de vibração com um simples ADS ou MADS instalado na estrutura estudada. Primeiramente, um único ADS instalado no topo da estrutura foi considerado com as propriedades m_d , k_d , e c_d propostas por LEE et al. (2006) e MIGUEL et al. (2016) (Tabela 3). O deslocamento máximo entre cada andar é estudado na Tabela 4.

Tabela 3: Características dos ADSs otimizados propostos por LEE et al. (2006) e MIGUEL et al. (2016).

Autor	m_d (kg)	k_d (N/m)	c_d (Ns/m)
Lee et al. (2006)	108000	3750000	151500
Miguel et al. (2016)	108000	3865000	181000

Tabela 4: Deslocamento máximo de cada andar com 1 ADS no topo. Comparação com a literatura.

Andar	Deslocamento (m) com 1 ADS no topo			
	Lee et al. (2006)	Presente estudo	MIGUEL et al. (2016)	Presente estudo
1	0,020	0,0186	0,0187	0,0187
2	0,039	0,0364	0,0366	0,0366
3	0,057	0,0529	0,0532	0,0532
4	0,073	0,0678	0,0682	0,0682
5	0,087	0,0811	0,0816	0,0816
6	0,099	0,0933	0,0938	0,0938
7	0,108	0,1037	0,1043	0,1043
8	0,117	0,1124	0,1129	0,1129
9	0,123	0,1185	0,1191	0,1191
10	0,126	0,1216	0,1223	0,1223

ADS	0,282	0,3554	0,3426	0,3426
-----	-------	--------	--------	--------

Os deslocamentos máximos obtidos com os valores de MIGUEL et al. (2016) são idênticos, e aqueles de LEE et al. (2006) muito próximos. O algoritmo de Newmark com ADS no topo é validado. É interessante notar que não se deve esquecer de adicionar um valor absoluto ao deslocamento para levar em consideração os deslocamentos de sinal negativo.

3.3.2. Otimização dos parâmetros do um ADS no topo

O algoritmo WOA de MIRJALILI e LEWIS (2016) foi adaptado para funcionar com o algoritmo de Newmark para os principais ADSs. O vetor a ser otimizado é: $\vec{x} = [k_d, c_d]$. A função que se está tentando minimizar é: $f_{obj}(\vec{x}) = \text{deslocamento_máximo_do_último_andar}(\vec{x})$, sob as restrições: $k_{dmin} < k_d < k_{dmax}$ e $c_{dmin} < c_d < c_{dmax}$. Onde $k_{dmax} = 5000 \text{ kN/m}$, $k_{dmin} = 5 \text{ kN/m}$, $c_{dmax} = 1000 \text{ kNs/m}$ e $c_{dmin} = 1 \text{ kNs/m}$ (VELLAR, 2019). O valor da massa do ADS m_d é estabelecido em 3% da massa total da estrutura, ou seja, 108000 kg.

Com o algoritmo WOA, 30 agentes de busca e 30 iterações, obtém-se os seguintes parâmetros: $k_d = 3249971 \text{ N/m}$; $c_d = 55763 \text{ Ns/m}$; $f_{obj} = 0,11928\text{m}$. A ordem de grandeza dos valores obtidos é semelhante à dos autores, porém o valor de c_d obtido é um pouco maior (Tabela 3). A curva de convergência da Figura 6 mostra que com 30 agentes de busca, o algoritmo converge rapidamente ao final das 5 primeiras iterações e em seguida se estabiliza.

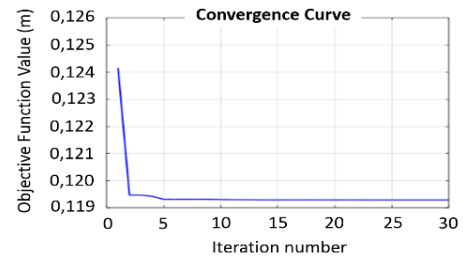


Figura 6: Curva de convergência do WOA para 1 ADS no topo.

Ao instalar um ADS no topo da estrutura com os parâmetros otimizados, encontram-se os deslocamentos máximos para cada andar na Tabela 5. Estes resultados são comparados com o ADS de MIGUEL et al. (2016). Os resultados são bem próximos e ainda melhores, o que valida a otimização.

Tabela 5: Deslocamento máximo de cada andar com 1 ADS no topo. Comparação sem ADS, com 1 ADS no topo (otimização de MIGUEL et al. (2016)) e com os parâmetros otimizados nesse estudo.

Andar	Deslocamento (m) sem ADS	Deslocamento com 1 ADS no topo (otimização de MIGUEL et al. (2016))	Redução de deslocamento (%) (MIGUEL et al. (2016))	Deslocamento com 1 ADS no topo (parâmetros desse estudo)	Redução de deslocamento (%) (esse estudo)
1	0,030405	0,0187	38,50	0,019164	38,50
2	0,059503	0,0366	38,49	0,036963	38,49
3	0,086494	0,0532	38,49	0,053009	38,49
4	0,111138	0,0682	38,63	0,067892	38,63
5	0,132734	0,0816	38,52	0,081710	38,53
6	0,150946	0,0938	37,86	0,093686	37,85
7	0,165609	0,1043	37,02	0,103586	37,02
8	0,176639	0,1129	36,08	0,111226	36,08
9	0,184003	0,1191	35,27	0,116635	35,27
10	0,187688	0,1223	34,84	0,119281	34,84
ADS	/	0,3426	/	0,412352	/

A redução do deslocamento de cada andar é de em média 37,4% para o ADS de MIGUEL et al. (2016) e também para o ADS do presente estudo. A utilização de um ADS no topo da estrutura possibilita a redução do deslocamento de cada andar de maneira significativa.

3.4. Sismo artificial

3.4.1. Verificação do algoritmo de geração de sismo artificial

O código desenvolvido para análise dinâmica de edifícios sem ADS foi adaptado para teste com um terremoto artificial criado a partir do espectro Kanai-Tajimi. O espectro de potência obtido para este estudo é apresentado na Figura 7. Esse trabalho é baseado nos trabalhos de BRANDÃO (2021) e MOHEBBI et al. (2013). Para criar o terremoto artificial, os mesmos parâmetros de MOHEBBI foram escolhidos: $\xi_g = 0,3$ (razão de amortecimento do solo), $\omega_g = 37,3 \text{ rad/s}$ (frequência natural do solo), $PGA = 0,475 \text{ g}$, $t_0 = 0 \text{ s}$ e $t_f = 50 \text{ s}$ (tempo inicial e final do acelerograma, respectivamente). A Figura 9 à direita mostra o acelerograma obtido por MOHEBBI et al. (2013) e a Figura 9 à esquerda mostra o acelerograma gerado neste estudo.

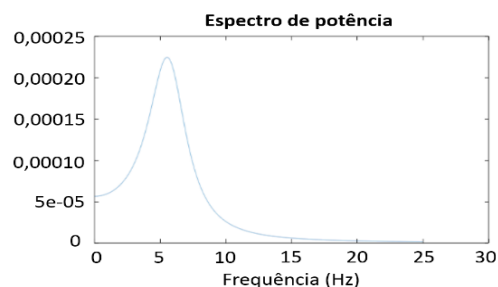


Figura 7: Espectro de potência obtido neste estudo com os dados de MOHEBBI et al. (2013).

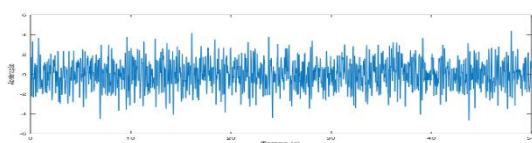


Figura 9: Acelerograma gerado neste estudo

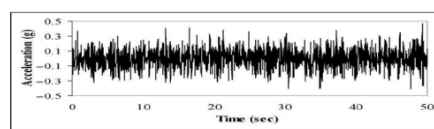


Figura 8: Acelerograma obtido por MOHEBBI et al. (2013)

Os dados de incremento de tempo para os 50s de sinal e a faixa de frequências para o espectro de Kanai-Tajimi, MOHEBBI et al. (2013) não são fornecidos. Entretanto, BRANDÃO (2021) indica $\Delta t = 0,02 \text{ s}$ para o acelerograma e para frequência (ω) foi estabelecido $\Delta \omega = 0,01 \text{ rad/s}$, sendo esta varia de 0 rad/s a $157,08 \text{ rad/s}$ (25 Hz). Para validar o programa de geração do sismo artificial, um sismo artificial é gerado e aplicado na estrutura estudada.

Primeiramente verifica-se que a frequência predominante do sinal gerado é localizada próxima da frequência natural do solo escolhida ($\omega_g = 37,3 \text{ rad/s} = 5,94 \text{ Hz}$). Para isso, a FFT (*Fast Fourier Transform*) do sinal temporal foi traçada. A frequência predominante do sinal é de aproximadamente 5,71 Hz (Figura 10). Em seguida, verifica-se que o valor máximo da aceleração do sinal gerado é aproximadamente igual a $PGA \times g = 0,475 \times 9,80665 = 4,658$. O valor máximo da aceleração neste caso é de $4,617 \text{ m/s}^2$. O PGA e a frequência predominante do sinal gerado são validados.

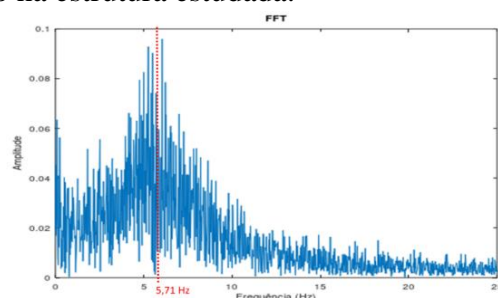


Figura 10: FFT do acelerograma gerado neste estudo

Este sinal foi aplicado à estrutura estudada. A Tabela 6 compara os deslocamentos e as acelerações obtidos por MOHEBBI et al. (2013). A geração de um terremoto artificial tem um elemento de aleatoriedade, então é normal não encontrar exatamente os mesmos resultados. Nota-se, entretanto, que os resultados estão próximos e de acordo com os valores das acelerações. O algoritmo para gerar um terremoto artificial é, portanto, validado.

Tabela 6: Deslocamento e aceleração de cada andar obtidos por MOHEBBI et al. (2013) e o presente estudo.

Andar	MOHEBBI et al. (2013)		Presente estudo	
	Deslocamento max (cm)	Aceleração max (cm/s ²)	Deslocamento max (cm)	Aceleração max (cm/s ²)
1	2,17	345,35	2,4361	370,29
2	4,30	571,60	4,7495	571,44
3	6,28	708,65	7,0980	645,27
4	8,01	708,65	9,3246	701,51
5	9,50	749,88	11,3583	754,46
6	10,75	719,11	13,1517	801,69
7	11,86	713,77	14,6547	842,74
8	12,88	713,73	15,8324	880,12
9	13,63	730,84	16,6472	910,47
10	14,03	802,68	17,0650	927,97

3.4.2. Geração do pior sismo para a estrutura estuda

O pior sismo para a estrutura estudada será criado. O pior sismo é aquele cuja frequência predominante corresponde à frequência natural do edifício. Começa-se calculando as 10 frequências próprias da estrutura. Resolve-se a seguinte equação com os valores próprios:

$$[K]\vec{u} = -\omega^2[M]\vec{u} \quad (14)$$

Com [K] a matriz de rigidez, [M] a matriz de massa, ω as frequências próprias e \vec{u} o vetor de deslocamento (de tamanho 1x10).

Obtêm-se então as frequências próprias da estrutura: $f_1 = 1,0108$ Hz, $f_2 = 3,0097$ Hz, $f_3 = 4,9414$ Hz, $f_4 = 6,7628$ Hz, $f_5 = 8,4331$ Hz, $f_6 = 9,9149$ Hz, $f_7 = 11,1753$ Hz, $f_8 = 12,1861$ Hz, $f_9 = 12,9247$ Hz, $f_{10} = 13,3745$ Hz.

Um terremoto artificial é criado com a frequência natural do solo: $\omega_g = 2\pi f_1 = 6,3510$ rad/s e para os outros parâmetros, os demais valores usados anteriormente (Apêndice 3).

O pior sismo é agora aplicado à estrutura sem ADS, com ADS instalado no topo otimizado neste estudo e com ADS instalado no topo otimizado por MIGUEL et al. (2016). Obtêm-se os resultados da Tabela 7. Vê-se que ao escolher a frequência do solo igual à frequência natural do edifício, o deslocamento de cada andar é maior do que com a excitação do terremoto El Centro. Vê-se que para o pior sismo, o uso de ADS neste estudo diminui também o deslocamento máximo de cada andar mas o percentual de redução é no entanto menor: 19,3% para o ADS de MIGUEL et al. (2016) e 19,8% para o ADS deste estudo, contra cerca de 37% com o sismo de El Centro.

A otimização dos valores do ADS foi alcançada com o terremoto El Centro. Para que a otimização seja confiável, deve ser realizada com base no terremoto que excita a estrutura. A partir de levantamentos geológicos, as características do solo podem ser conhecidas. É então possível obter um terremoto típico do local onde o edifício está localizado a partir do algoritmo de geração de terremotos aleatórios.

Tabela 7: Deslocamento de cada andar para a estrutura sem ADS, com 1ADS instalado no topo otimizado neste estudo e por MIGUEL et al. (2016), todas submetidas ao pior sismo.

Andar	Deslocamento (m)						
	Sem ADS			ADS no topo (parâmetros desse estudo)		1 ADS no topo (parâmetros de MIGUEL et al. (2016))	
	1° sismo artificial	El centro	Pior sismo	Pior sismo	Redução de deslocamento (%) com o pior sismo	Pior sismo	Redução de deslocamento (%) com o pior sismo
1	0,024361	0,030405	0,096180	0,076716	20,24	0,077447	19,48
2	0,047495	0,059503	0,189747	0,151409	20,20	0,152628	19,56
3	0,070980	0,086494	0,278663	0,222507	20,15	0,224019	19,61
4	0,093246	0,111138	0,360982	0,288493	20,08	0,290177	19,61
5	0,113583	0,132734	0,434927	0,347973	19,99	0,349795	19,57
6	0,131517	0,150946	0,498949	0,399747	19,88	0,401728	19,48
7	0,146547	0,165609	0,551746	0,442835	19,74	0,444980	19,35
8	0,158324	0,176639	0,592272	0,476476	19,55	0,478719	19,17
9	0,166472	0,184003	0,619733	0,500113	19,30	0,502288	18,95
10	0,170650	0,187688	0,633598	0,513370	18,98	0,515643	18,62
ADS	/	/	/	0,740787	/	1,482429	/

3.5. MADS

3.5.1. Posição e parâmetros da literatura

Para iniciar este estudo com vários ADSs, primeiramente será aplicado um conjunto de ADSs otimizados sobre a estrutura proposto por BRANDÃO (2021) e que se baseia na solução do cenário 3: solução 1 de MIGUEL et al. (2016). Esse conjunto de dados foi obtido minimizando a raiz quadrada da média quadrada do deslocamento do último andar. São 6 ADSs posicionados verticalmente ao longo do andares. A Tabela 8 mostra os parâmetros de cada ADS e os andares onde estão instalados. A soma de todas as 6 ADSs representa 3% da massa total. O edifício estudado tem as mesmas características que precedentemente e o terremoto aplicado é El Centro.

Tabela 9: Parâmetros dos 6 ADSs e os andares onde estão instalados segundo a otimização de MIGUEL et al. (2016).

Andar	m_d (kg)	k_d (N/m)	c_d (Ns/m)
3	18000	527714	42904
5	18000	636176	27286
6	18000	827312	17364
7	18000	741887	20023
8	18000	674301	19529
10	18000	591516	14803

Tabela 8: Deslocamento de cada andar com os 6 ADSs dimensionados por MIGUEL et al. (2016).

Andar	Deslocamento (em m)		
	MIGUEL et al. (2016)	Presente estudo	Redução do deslocamento (%)
1	0,0208	0,0208	31,59
2	0,0406	0,0406	31,77
3	0,059	0,0590	31,79
4	0,0755	0,0755	32,07
5	0,0897	0,0897	32,42
6	0,1016	0,1016	32,69
7	0,1123	0,1123	32,19
8	0,1206	0,1206	31,72
9	0,1263	0,1263	31,36
10	0,1292	0,1292	31,16

Quando aplica-se o conjunto de ADSs, propostos por MIGUEL et al. (2016), os resultados obtidos são idênticos para o deslocamento de cada andar (Tabela 9). A redução média para cada andar é de 31,9% . O algoritmo de Newmark para MADS é validado.

3.5.2 Otimização dos parâmetros dos 6 ADS verticais e localização fixa

Agora serão otimizados os parâmetros desses 6 ADSs com o algoritmo WOA, mantendo sua localização. MIGUEL et al. (2016) minimizaram a raiz quadrada da média quadrada do deslocamento do último andar. Nesse trabalho é minimizado o deslocamento máximo do último andar, conserva-se esse critério para aplicar a mesma função objectiva em cada cenário. A otimização foi realizada com 30 agentes de busca e 30 iterações, o resultado da função objetivo, ou seja, o deslocamento máximo do último andar é próximo daquele calculado por MIGUEL et al. (2016). Os valores otimizados de m_d , k_d e c_d de cada ADS com essa otimização são apresentados na Tabela 11. Observe que alguns valores de c_d estão próximos do limite inferior. O deslocamento máximo de cada andar com este conjunto de ADSs é dado pela Tabela 10. A curva de convergência (Figura 11) mostra que a otimização converge rapidamente até a décima iteração e depois se estabiliza.

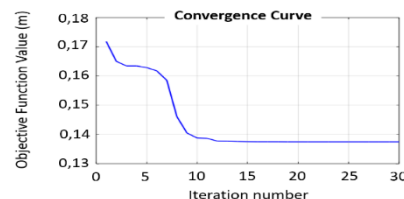


Figura 11: Curva de convergência WOA para 6 ADSs.

Tabela 11: Valores otimizados de m_d , k_d e c_d dos 6 ADSs

Andar	m_d (kg)	k_d (N/m)	c_d (Ns/m)
3	18000	1356208	3858
5	18000	1755304	561454
6	18000	605165	519085
7	18000	188547	87733
8	18000	690260	1000
10	18000	620728	1000

Tabela 10: Deslocamento de cada andar com os 6 ADSs dimensionados nesse estudo.

Andar	Deslocamento (m) dos andares com 6 ADSs dimensionados nesse estudo	Redução do deslocamento (%)
1	0,023290	23,40
2	0,045424	23,66
3	0,065750	23,98
4	0,083982	24,43
5	0,099824	24,79
6	0,112857	25,23
7	0,123028	25,71
8	0,130420	26,16
9	0,135243	26,50
10	0,137440	26,77

A otimização de MIGUEL et al. (2016) permite reduzir o deslocamento de cada andar de em média 31,9% e a otimização desse trabalho de 25,07% logo a otimização de MIGUEL et al. (2016) é melhor. A diferença nos resultados pode ser explicada pela diferença na função objetivo utilizada ou também pelo número de agentes de busca e iterações.

Também tenta-se aplicar vários conjuntos de ADSs oferecidos por VELLAR et al. (2019) sob um terremoto gerado artificialmente seguindo os parâmetros fornecidos por VELLAR et al. (2019). No entanto, a comparação dos resultados com este autor não é muito relevante, pois seu trabalho se baseia em uma seleção aleatória dos parâmetros de entrada do terremoto, assim como dos parâmetros m , k e c da estrutura. Essa comparação foi então abandonada.

3.5.3 Otimização da localização dos MADS

Agora serão otimizadas as localizações dos ADSs na estrutura. Limita-se o número de ADS a 1 por andar. A estratégia adotada é assumir que 10 ADS estão posicionados na estrutura. Ao contrário das otimizações anteriores onde o valor da massas dos ADSs foram fixadas em 3% da massa total da estrutura, as massas ficarão como parâmetros a ser otimizados. Desta forma, espera-se obter durante a otimização alguns valores de massas próximas de 0 kg para alguns ADSs, e nesses andares os ADSs não são relevantes.

A função minimizada é o deslocamento máximo do último andar. Os valores máximos de k_d e c_d são iguais aos definidos na seção 3.3.2. Os valores mínimos são modificados : $k_d = 1 N/m$ et $c_d = 1 Ns/m$. Os valores mínimo e máximo das massas a serem otimizadas são, respectivamente, 1kg e 15000 kg. Zero não pode ser usado para valor mínimo porque isso implicaria em uma singularidade na resolução das equações. Se a massa dos ADSs tivesse sido fixada, seria igual a 3% da massa total do edifício, ou seja, 10800 kg para cada ADS, logo foi considerado um valor um pouco superior a 10800 kg. A otimização foi realizada com o terremoto El Centro. A Tabela 12 agrupa os valores m_d , k_d e c_d encontrados para cada ADS através da otimização WOA com 50 agentes de busca e 50 iterações. Vê-se que alguns parâmetros estão iguais a 1 e não se pode distinguir qual andar exigiria ou não um ADS. A solução de otimização converge rapidamente em 5 iterações e se estabiliza (Figura 12). No entanto esta otimização é irrelevante, não sendo interessante aplicar este conjunto de ADSs à estrutura.

Tabela 12: Valores m_d , k_d e c_d encontrados para os 10 ADSs através da otimização WOA com massa variável

ADS	m_d (kg)	k_d (N/m)	c_d (Ns/m)
1	1	206058	289285
2	5827	1730007	426663
3	4749	440112	154445
4	6258	1128191	389450
5	1865	371173	586627
6	2813	1	360257
7	4578	1	17513
8	1,00	1	72024
9	3372	232615	39729
10	1,00	3637813	1

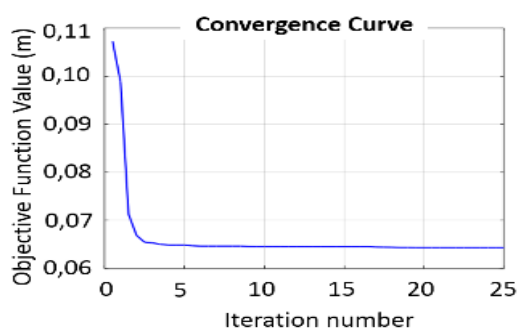


Figura 12: Curva de convergência do WOA para a otimização de 10 ADSs com massa não fixa.

3.5.4 Otimização de 10 ADSs verticais com massa fixa

Agora otimizam-se os parâmetros k_d e c_d dos 10 ADSs, posicionados verticalmente, 1 ADS em cada andar. A Tabela 13 agrupa os valores de m_d , k_d e c_d de cada ADS encontrados pela otimização, bem como o deslocamento máximo de cada andar com esse conjunto de ADSs. A otimização com WOA foi realizada com 50 agentes de busca e 50 iterações. O deslocamento de cada andar foi reduzido em média 65,6%. A otimização com WOA permitiu encontrar parâmetros possíveis de k_d e c_d para os 10 ADS.

Tabela 13: Valores m_d , k_d e c_d dos 10 ADSs encontrados pela otimização WOA com massa fixa e dos deslocamentos de cada andar.

ADS/ Andar	m_d (kg)	k_d (N/m)	c_d (Ns/m)	Deslocamento do andar (m)	Redução do deslocamento (em %)
1	10800	714863	380065	0,010434	65,68
2	10800	13796	313978	0,020269	65,94
3	10800	1327405	758016	0,029412	66,00
4	10800	832501	252243	0,037565	66,20
5	10800	1570363	168878	0,044946	66,14
6	10800	1520549	10512	0,051470	65,90
7	10800	687898	56131	0,057170	65,48
8	10800	4377246	52995	0,062006	64,90
9	10800	198573	498050	0,064374	65,01
10	10800	3331994	439987	0,065811	64,94

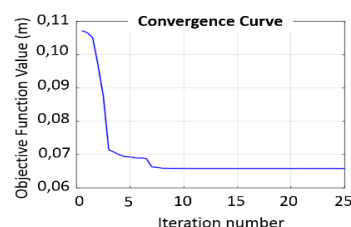


Figura 13: Curva de convergência para a otimização de 10 ADSs com massa fixa.

3. CONCLUSÃO

O objetivo geral desse trabalho é realizar a otimização de parâmetros de projeto (massa, mola e amortecimento) e posições de Atenuadores Dinâmicos Sincronizados (ADS) utilizados como sistema de controle de vibrações em edifícios submetidos à excitação sísmica, a fim de determinar para o edifício estudado, o melhor cenário de controle que corresponde à adequação da estrutura ao critério de deslocamento máximo dos andares.

Este estudo foi realizado em particular no modelo de *shear building* usado também por LEE et al. (2006), BEKDAS e NIGDELI (2011) e MIGUEL et al. (2016), sujeito ao terremoto El Centro e a um sismo gerado artificialmente. Foi demonstrado que o uso de ADS ou MADS posicionados em uma estrutura sujeita à excitação sísmica pode reduzir significativamente o deslocamento máximo dos andares.

Quando um único ADS é usado, ele geralmente é posicionado no topo da estrutura e sua massa é fixada em 3%. O algoritmo WOA desenvolvido neste trabalho possibilitou propor um par de valores possíveis para a rigidez e o amortecimento do ADS. Por outro lado, o ADS dimensionado nesse estudo permite a redução dos deslocamentos menos eficazmente no caso do pior sismo. Assim, é preferível ter um acelerograma do terremoto ao qual a estrutura poderia estar sujeita. Conhecendo as características geológicas do local do edifício, é possível gerar um sismo artificial típico dos sismos que podem ocorrer neste local e, portanto, conseguir talvez uma melhor otimização dos parâmetros ADS.

No caso dos MADS, a proposta de MIGUEL et al. (2016) com 6 ADSs permite reduzir o deslocamento médio dos andares em 31%. Mantendo esta escolha de localização dos ADSs e o somatório das massas das ADSs em 3% da massa total da estrutura, foi realizada uma otimização WOA nos parâmetros das ADSs (rigidez e amortecimento). A redução do deslocamento médio obtido para os andares é de 25%, um resultado não tão bom quanto o de MIGUEL et al. (2016). A otimização das posições dos ADSs não foi bem-sucedida. Em seguida, foram otimizados a rigidez e o amortecimento (massa fixa em 3% da massa total) de 10 ADSs cada um posicionado em um andar. O deslocamento médio dos andares obtido com este último cenário é de 65%.

Dentre todos os cenários de controle estudados neste trabalho, este com 10 ADSs possibilitou reduzir ao máximo o deslocamento do último andar sob a excitação do terremoto El Centro, mas esta solução certamente seria mais cara de implementar do que o uso de um único ADS no topo da estrutura.

Na perspectiva deste trabalho, seria interessante encontrar mais trabalhos sobre MADS a fim de ter mais dados de comparação, para estudar o arranjo horizontal de MADS no mesmo andar e também para encontrar uma solução para otimizar a posição dos MADS. Por outro lado, o estudo do número de agentes de busca e de iterações de WOA não foi feito em detalhes e, portanto, não foi apresentado aqui. Também seria relevante trabalhar com outros registros de terremotos reais, em particular no caso de MADS. Finalmente, uma abordagem não determinística como a proposta no artigo de VELLAR (2019) levaria em consideração o aspecto aleatório das variáveis de entrada estudadas e teria resultados mais confiáveis de acordo com distribuições de probabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (AISC). **ANSI/AISC 360-16**: Specification for Structural Steel Buildings. AISC: Chicago, Illinois, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15421**: Projeto de estruturas resistentes a sismos-procedimentos. ABNT: Rio de Janeiro, 2006.

ÁVILA, S. M. **Controle Híbrido para atenuação de vibrações em edifícios**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

BEKDAS, G.; NIGDELI, SM. “Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search”, *Eng Struct* 2011 ; 33:2716–23.

BRADÃO, FS. **Otimização de atenuadores dinâmicos sincronizados para o controle de vibrações em edifícios submetidos à excitação sísmica**, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre 2021.

ELIAS, S.; MATSAGAR, V. Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers. **Annual Reviews in Control**, v. 44, p. 129-156, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (ECS). **EUROCODE 8**. EN 1998- 1: Design of structures for earthquake resistance – General rules, seismic actions and rules for buildings. ECS: Brussels, 2010.

HADI, M.N.S., ARFIADI, Y. Optimum design of absorber for MDOF structures. **Journal of Structural Engineering (ASCE)**, v.124, n.11, p. 1272-1280, 1998.

HOLLAND, JH. **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

KANAI, K. Na empirical formula for the spectrum of Strong earthquake motions. **Bulletin Earthquake Research Institute-University of Tokyo**, v. 39, n.1, p. 85-95, 1961.

LEE, CL.; CHEN, YT., CHUNG, LL.; WANG, YP. Optimal design theories and applications of tuned mass dampers. **Engineering Structures**, v. 28, n. 1, p. 43-53, 2006.

MIGUEL, LFF.; LOPEZ, RH; FADEL MIGUEL, LFF. **Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search**, *Eng. Struct.* 33 (9) 2716–2723, 2013.

MIGUEL LFF. **Introdução ao Estudo de Vibrações, notas de Aula de ENG03374 – Vibrações I**. (UFRGS), 2006.

MIGUEL, LFF.; FADEL MIGUEL, LF.; LOPEZ, RH. Methodology for the simultaneous optimization of location and parameters of friction dampers in the frequency domain. **Engineering Optimization**, v. 50, n. 12, p. 2108-2122, 2018.

MIGUEL, LFF.; LOPEZ, RH.; FADEL MIGUEL, LF. TORII, AJ. A novel approach to the optimum design of MTMDs under seismic excitations. **Structural Control and Health Monitoring**, v.23, n.11, p. 1290-1313, 2016.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). **Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente-NSR-10**. MAVDT: Bogotá, 2010.

MIRJALILI, S.; LEWIS, A. The whale optimization algorithm. **Advances in Engineering Software**, v. 95, p. 51-67, 2016.

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**, v. 19, n. 4, p. 605-625, 2013.

NEWMARK, MNA. Method of computation for Structural Dynamics. **Journal of the Engineering Mechanics Division- ASCE**, v. 85, n. 3, p. 67-94, 1959.

PEÑA, L. A. P. **Análise dos efeitos provocados por abalos sísmicos em estruturas irregulares**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)-Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

ROSSATO, L. V. **Otimização de amortecedores de massa sintonizados em estruturas submetidas a um processo estacionário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SHINOZUKA, M.; JAN, CM. Digital simulation of random processes and its applications. **Journal of Sound and Vibration**, v. 25, n. 1, p. 111-128, 1972.

TAJIMI, HA. statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake. In: 2nd World Conference in Earthquake Engineering, 1960, Tokyo. **Proceedings...** ok o, 1960. p. 781-797.

VELLAR LS. ; PEREZ SPO.; MIGUEL LFF.; FADEL MIGUEL LF. **“Robust Optimum Design of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in Buildings Subjected to Seismic Excitation”**, Shock and Vibration, v. 2019, Article ID 9273714, 9 Pages, 2019.

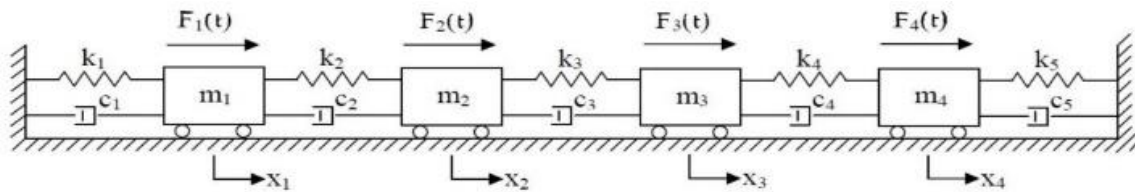
VIBRATION DATE. (s.a). **El Centro Earthquake Page**. Disponível em: <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>. Acesso em: 26/09/2021.

YANG, X. S. **Nature-inspired metaheuristic algorithm**. 1st ed. United Kingdom: Luniver Press, 2008.

APÊNDICES

Apêndice 1

Sistema com 4 graus de liberdade sujeito a forças harmônicas (notas de Aula de Vibrações da Professora Letícia Fleck Fadel Miguel (UFRGS, 2006).



Dados:

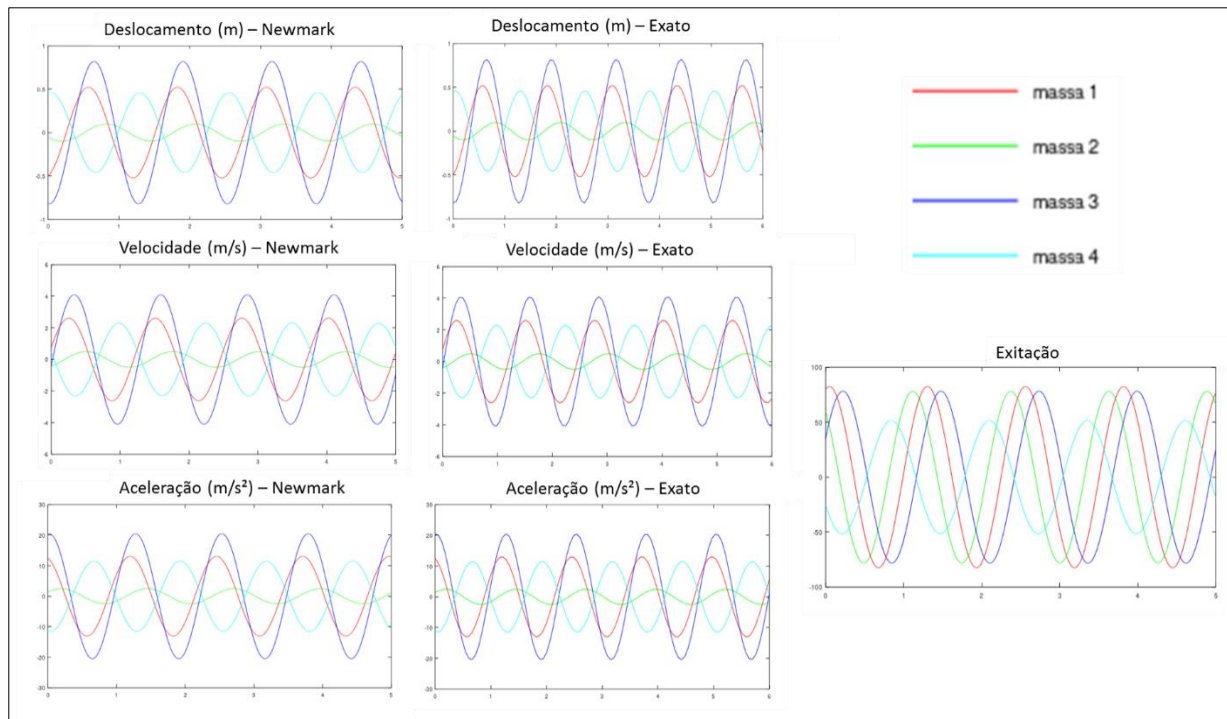
$m_1 = 8\text{kg}$	$k_1 = 30\text{N/m}$	$c_1 = 6\text{Ns/m}$	$F_1(t) = +20\text{sen}5t + 80\text{cos}5t$
$m_2 = 9\text{kg}$	$k_2 = 45\text{N/m}$	$c_2 = 9\text{Ns/m}$	$F_2(t) = -50\text{sen}5t + 60\text{cos}5t$
$m_3 = 5\text{kg}$	$k_3 = 50\text{N/m}$	$c_3 = 10\text{Ns/m}$	$F_3(t) = +70\text{sen}5t + 35\text{cos}5t$
$m_4 = 6\text{kg}$	$k_4 = 20\text{N/m}$	$c_4 = 4\text{Ns/m}$	$F_4(t) = -45\text{sen}5t - 25\text{cos}5t$
	$k_5 = 25\text{N/m}$	$c_5 = 5\text{Ns/m}$	

$$x(0) = \begin{bmatrix} -0,500565 \\ -0,055132 \\ -0,814934 \\ 0,450169 \end{bmatrix} \text{m}$$

$$\dot{x}(0) = \begin{bmatrix} 0,750247 \\ -0,410529 \\ -0,411299 \\ 0,480426 \end{bmatrix} \text{m/s}$$

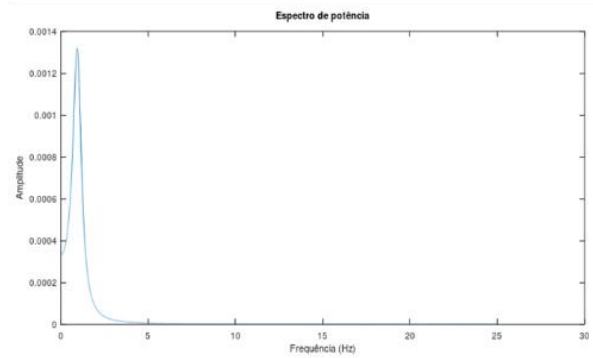
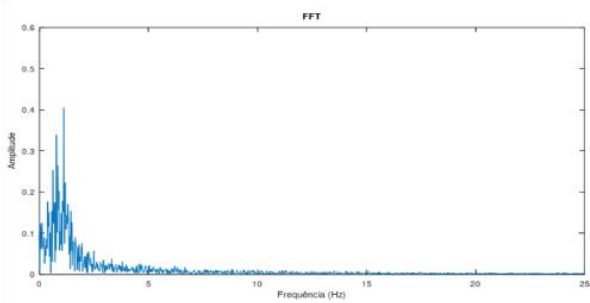
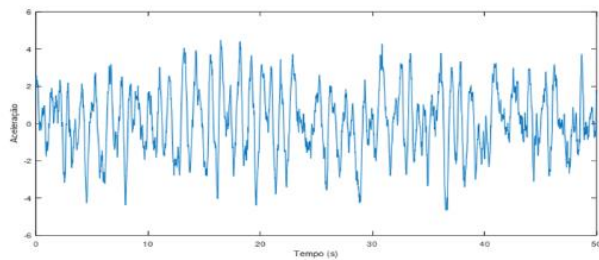
Apêndice 2

Deslocamento, Velocidade e aceleração para cada massa com o algoritmo de Newmark (à esquerda) e com o método exato (ao centro). Excitação para cada massa (à direita).



Apêndice 3

Acelerograma do pior sismo para a estrutura estuda (em cima à esquerda), FFT do sinal do acelerograma (em baixo à esquerda), o espectro de potência (à direita).



Apêndice 4

Recapitulação do deslocamento de cada andar para diferentes cenários de ADS instalados na estrutura submetida a excitação do sismo El Centro.

Andar	Sem ADS	1 ADS MIGUEL et al. (2016)	1 ADS no topo otimizado nesse estudo	6 ADSs MIGUEL et al. (2016)	6 ADSs otimizados nesse estudo	10 ADSs otimizados nesse estudo
1	0,0304	0,0187	0,019164	0,0208	0,023290	0,010434
2	0,0595	0,0366	0,036963	0,0406	0,045424	0,020269
3	0,0865	0,0532	0,053009	0,059	0,065750	0,029412
4	0,1111	0,0682	0,067892	0,0755	0,083982	0,037565
5	0,1327	0,0816	0,081710	0,0897	0,099824	0,044946
6	0,1509	0,0938	0,093686	0,1016	0,112857	0,051470
7	0,1656	0,1043	0,103586	0,1123	0,123028	0,057170
8	0,1766	0,1129	0,111226	0,1206	0,130420	0,062006
9	0,1840	0,1191	0,116635	0,1263	0,135243	0,064374
10	0,1877	0,1223	0,119281	0,1292	0,137440	0,065811
Redução média do deslocamento (%)	/	37,4%	37,4%	31,9%	25,07%	65,6%
Redução do deslocamento do um último andar (%)	/	34,8%	36,5%	31,2%	26,78%	64,94%