

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DE MÚLTIPLOS AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS  
PARA CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE EDIFÍCIOS SUBMETIDOS A SISMOS

por

Luciara Silva Vellar

Tese para obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2022.

OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DE MÚLTIPLOS AMORTECEDORES DE MASSA SINTONIZADOS  
PARA CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE EDIFÍCIOS SUBMETIDOS A SISMOS

por

Luciara Silva Vellar  
Mestre em Engenharia Mecânica

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jesús Daniel Villalba Morales.....PUJ / Colômbia

Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.....PPGEng / UPF

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas.....PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 21 de Março de 2022.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida, por permitir o estudo e desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço aos meus pais Paulo Alberto Vellar e Maria de Lourdes Silva Vellar primeiramente pela vida, pelo incentivo e apoio em estudar, lutar por meus objetivos e sonhos, sempre dispostos a me apoiar nas diversas decisões e escolhas da vida.

Agradeço ao meu marido Joel Scheeren por me incentivar, estando ao meu lado e não deixando desistir ao longo do percurso e frente as dificuldades encontradas.

Sou grata aos professores e mestres pela transmissão de seus conhecimentos com muita ênfase e empenho nos ensinamentos.

Agradeço em especial a minha professora e orientadora, Leticia Fleck Fadel Miguel, pela sabedoria transmitida e pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

À banca pelas contribuições e auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas do GMAp pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao aluno de doutorado Leonel Echer e seus colegas do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) da UFRGS pela elaboração do *template* do PROMEC em LateX, fundamental para a elaboração da presente versão em formato doc.

## RESUMO

Com o passar dos anos e a demanda por estruturas cada vez mais esbeltas e de menor custo, tem-se a necessidade de desenvolvimento de sistemas de controle de vibrações eficazes. Dispositivos de dissipação de energia passivos são bem conhecidos devido ao seu bom desempenho para controle de vibrações em edifícios sujeitos a excitações dinâmicas. O amortecedor de massa sintonizado (*Tuned Mass Damper* - TMD) é um dos dispositivos passivos mais antigos e mais usados para controle de vibrações em edifícios em todo o mundo. No entanto, os melhores parâmetros em termos de rigidez e amortecimento, assim como as melhores posições dos TMDs a serem instalados na estrutura permanecem sendo difícil de determinar, especialmente quando mais de um TMD precisa ser instalado, ou seja, quando há a necessidade de se instalar múltiplos amortecedores de massa sintonizados (*Multiple Tuned Mass Dampers* - MTMD). Assim, a otimização de parâmetros, quantidade e posições de MTMD é uma área que vem sendo estudada nos últimos anos, buscando projetos ótimos de tal dispositivo, para minimização da resposta dinâmica estrutural. Portanto, nesta tese, propõe-se uma metodologia para otimização simultânea de parâmetros e posições de MTMD em edifícios submetidos a sismos. É importante ressaltar que, diferente da maioria dos trabalhos da literatura, a metodologia de otimização proposta nesta tese considera as incertezas presentes nos parâmetros estruturais, na carga dinâmica (sismos) e também nos parâmetros dos MTMD, ou seja, propõem-se uma metodologia de otimização robusta. Desta forma, obtém-se um projeto ótimo robusto, ou seja, um projeto de MTMD que não é sensível às variações dos parâmetros envolvidos no comportamento dinâmico do sistema. Para fins de ilustração, a metodologia proposta é aplicada em um prédio de 10 andares, confirmando sua eficácia. Adicionalmente, novamente com o objetivo de confirmar a eficácia da metodologia proposta para projeto ótimo robusto de MTMD, avalia-se a resposta dinâmica do edifício em estudo submetido a registros sísmicos reais e equipado com os MTMD otimizados pelo método proposto, confirmando novamente a eficácia da metodologia desenvolvida. Assim, acredita-se que a metodologia proposta pode ser utilizada como uma ferramenta promissora para o projeto de MTMD.

**Palavras-chave:** Múltiplos Amortecedores de Massa Sintonizados (MTMD), Otimização de Projeto Robusta, Incertezas, Controle de Vibração, Algoritmos Metaheurísticos.

## ABSTRACT

Over the years and with the demand for increasingly slender and lower cost structures, there is a need to develop effective vibration control systems. Passive energy dissipation devices are well known for their good performance in controlling vibrations in buildings subject to dynamic excitation. The tuned mass damper (TMD) is one of the oldest and most used passive devices for vibration control in buildings around the world. However, the best parameters in terms of stiffness and damping, as well as the best positions of the TMDs to be installed in the structure remain difficult to determine, especially when more than one TMD needs to be installed, that is, when there is a need to install multiple tuned mass dampers (MTMD). Thus, the optimization of parameters, quantity and positions of MTMD is an area that has been studied in recent years, seeking optimal designs of such a device, to minimize the structural dynamic response. Therefore, in this thesis, a methodology is proposed for the simultaneous optimization of MTMD parameters and positions in buildings subjected to earthquakes. It is important to emphasize that, unlike most works in the literature, the optimization methodology proposed in this thesis considers the uncertainties present in the structural parameters, in the dynamic load (earthquakes) and also in the MTMD parameters, that is, a methodology for robust optimization. In this way, an optimal robust design is obtained, that is, an MTMD design that is not sensitive to variations in the parameters involved in the dynamic behavior of the system. For illustration purposes, the proposed methodology is applied to a 10-story building, confirming its effectiveness. Additionally, again with the objective of confirming the effectiveness of the proposed methodology for robust MTMD design, the dynamic response of the building under study is evaluated, subjected to real seismic records and equipped with the MTMD optimized by the proposed method, again confirming the effectiveness of the methodology developed. Thus, it is believed that the proposed methodology can be used as a promising tool for the MTMD design.

**Keywords:** Multiple Tuned Mass Dampers (MTMD), Robust Design Optimization, Uncertainties, Vibration Control, Metaheuristic Algorithms.

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Motivação .....	2
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Organização do Trabalho .....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1	Amortecedor de Massa Sintonizado (TMD) .....	9
2.2	Otimização de TMDs .....	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1	Ações Dinâmicas em Estruturas.....	18
3.1.1	Sismo.....	19
3.1.2	Placas Tectônicas .....	19
3.1.3	PGA, amortecimento e frequência do solo.....	21
3.1.4	Sismos adotados .....	21
3.1.4.1	Sismo El Centro .....	22
3.1.4.2	Sismo Loma Prieta .....	22
3.1.4.3	Kumamoto Shi Japan .....	23
3.2	Otimização .....	23
3.3	Distribuição LogNormal .....	26
3.4	<i>Latin Hypercube Sampling</i> (LHS).....	26
4	METODOLOGIA PROPOSTA.....	27
4.1	Resposta Dinâmica da Estrutura .....	27
4.2	Método de Newmark.....	27
4.3	Parâmetros Aleatórios do Edifício .....	28
4.4	Dimensionamento de Múltiplos TMDs.....	29
4.5	Geração do Sinal de Excitação.....	31

4.6	Algoritmo e Problema de Otimização Robusta.....	32
4.6.1	<i>Butterfly Optimization Algorithm</i> (BOA).....	33
4.6.2	<i>Grey Wolf Optimizer</i> (GWO).....	37
4.6.3	<i>The Whale Optimization Algorithm</i> (WOA).....	42
4.7	Deslocamento Relativo entre Andares ( <i>Drift</i> ) – NSR-10.....	48
4.8	Critérios para Conforto Humano.....	50
4.9	Determinação da validação dos parâmetros obtidos com a otimização e <i>Drift</i> .....	52
4.9.1	Critérios.....	52
4.9.2	Seleção de movimentos de solo.....	53
4.9.3	Faixa de período para escala.....	53
4.9.4	<i>Drift</i> .....	53
4.10	Etapas da Metodologia.....	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1	Dados Utilizados.....	59
5.1.1	Parâmetros Aleatórios do Edifício, dos TMDs e da Excitação.....	59
5.1.2	Otimização Robusta dos MTMD.....	60
5.1.3	Excitação Sísmica.....	60
5.1.4	Sistema de Amortecimento TMD / MTMD.....	61
5.1.5	Algoritmos e parâmetros da otimização.....	61
5.2	Resultados da Otimização Robusta.....	72
5.2.1	Resultados da Otimização Robusta – Determinação dos parâmetros com função objetivo <i>Drift</i> .....	74
5.2.2	Resultados da Otimização Robusta – Determinação dos parâmetros com função objetivo Aceleração.....	79
5.2.3	Resultados da Otimização Robusta – Validação dos parâmetros com função objetivo <i>Drift</i> por sismos reais.....	84
5.2.4	Resultados da Otimização Robusta – Determinação dos parâmetros com função objetivo <i>Drift</i> – 1º Modo.....	95

5.2.5	Resultados da Otimização Robusta – Validação dos parâmetros com função objetivo <i>Drift</i> por sismos reais – 1º modo .....	101
6	CONCLUSÕES .....	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	107



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edifício de n-graus de liberdade com NTMD amortecedores de massa sintonizados horizontalmente e verticalmente distribuídos ao longo do edifício – Fonte: Vellar et al., 2019. ....	29
Figura 2 - Pseudocódigo <i>Butterfly Optimization Algorithm</i> [Adaptada de Arora et al., 2018]. ....	37
Figura 3 - Hierarquia do lobo cinzento (a dominância diminui de cima para baixo). ....	38
Figura 4 - Pseudocódigo <i>Grey Wolf Optimizer</i> [Adaptada de Mirjalili et al., 2014]. ....	42
Figura 5 - Comportamento de alimentação com rede de bolhas de baleias jubarte [Mirjalili et al., 2016].....	43
Figura 6 - Vetores de posição 2D e 3D e suas próximas localizações possíveis ( $X^*$ é a melhor solução obtida até agora) [Mirjalili et al., 2016].....	44
Figura 7 - Mecanismo de busca em rede de bolhas implementado no WOA ( $X^*$ é a melhor solução obtida até agora): (a) mecanismo de encolhimento e (b) posição de atualização da espiral [Mirjalili et al., 2016] .....	45
Figura 8 - Mecanismo de exploração implementado no WOA ( $X^*$ é um agente de busca escolhido aleatoriamente) [Mirjalili et al., 2016].....	47
Figura 9 – Pseudocódigo <i>Whale Optimization Algorithm</i> (WOA) [Adaptada de Mirjalili et al., 2016].....	48
Figura 10 – Níveis de conforto frequência versus amplitude para estruturas sujeitas às ações do vento [Blessmann, 2005].....	51
Figura 11 – Esquema das várias etapas da metodologia [Próprio Autor, 2022] .....	54
Figura 12 – Escolha dos parâmetros aleatórios [Próprio Autor, 2022].....	54
Figura 13 – Otimização Robusta dos MTMD [Próprio Autor, 2022].....	55
Figura 14 – Escolha dos parâmetros da Excitação Sísmica [Próprio Autor, 2022] .....	55
Figura 15 – Escolha dos limites das variáveis de projeto do sistema de amortecimento [Próprio Autor, 2022].....	56
Figura 16 – Escolha do Algoritmo e respectivos Parâmetros [Próprio Autor, 2022] .....	56
Figura 17 – Escolha dos Parâmetros ótimos com função objetivo <i>Drift</i> [Próprio Autor, 2022] .....	57

Figura 18 – Escolha dos Parâmetros ótimos com função objetivo Aceleração [Próprio Autor, 2022].	57
Figura 19 – Verificação dos Parâmetros ótimos com função objetivo <i>Drift</i> e Sismos Reais [Próprio Autor, 2022]	58
Figura 20 - Densidade Espectral - Sinal da Excitação por Kanai-Tajimi.	72
Figura 21 - Aceleração do solo em função do tempo.	73
Figura 22 - Espectro do sinal de aceleração.	73
Figura 23 - <i>Drift</i> em função do tempo.	95
Figura 24 – Curvas de convergência cenário 3 <i>Drift</i> - 1º Modo 10.10.10.	98
Figura 25 – Curvas de convergência cenário 3 <i>Drift</i> - 1º Modo 30.30.30.	99
Figura 26 – Curvas de convergência cenário 3 <i>Drift</i> - 1º Modo 50.50.50	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Bibliografia de tipos de sistemas de controle .....	8
Tabela 2 – Limite para deslocamentos relativos entre pavimentos ( $\Delta x$ ) NSR-10. ....	49
Tabela 3 - Categorias de utilização e fatores de importância de utilização ( <i>I</i> ). ....	50
Tabela 4 - Valor médio e coeficiente de variação de cada variável aleatória de entrada.....	60
Tabela 5 – Configurações dos parâmetros da otimização .....	63
Tabela 6 – Simulações para determinação do algoritmo e parâmetros de otimização.....	64
Tabela 7 – Configuração 1: 20 Agentes, 100 Iterações e 30 Amostras .....	66
Tabela 8 – Configuração 2: 30 Agentes, 40 Iterações e 30 Amostras .....	66
Tabela 9 – Configuração 3: 30 Agentes, 100 Iterações e 30 Amostras .....	67
Tabela 10 – Configuração 4: 40 Agentes, 20 Iterações e 30 Amostras .....	68
Tabela 11 – Configuração 5: 40 Agentes, 40 Iterações e 30 Amostras .....	68
Tabela 12 – Configuração 6: 50 Agentes, 15 Iterações e 30 Amostras .....	69
Tabela 13 – Configuração 7: 50 Agentes, 15 Iterações e 50 Amostras .....	70
Tabela 14 – Configuração 8: 50 Agentes, 30 Iterações e 30 Amostras .....	70
Tabela 15 – Configuração 9: 50 Agentes, 50 Iterações e 50 Amostras .....	71
Tabela 16 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 1 - <i>Drift</i> .....	74
Tabela 17 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 2 - <i>Drift</i> .....	75
Tabela 18 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 - <i>Drift</i> .....	75
Tabela 19 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 1 .....	76
Tabela 20 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 2 .....	77
Tabela 21 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3 .....	78
Tabela 22 – Comparativo redução <i>Drift</i> - Projeto Robusto de MTMD para os cenários 1, 2 e 3 .....	79
Tabela 23 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 1 - Aceleração .....	80
Tabela 24 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 2 - Aceleração .....	80

Tabela 25 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 - Aceleração .....	81
Tabela 26 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 1 .....	81
Tabela 27 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 2 .....	82
Tabela 28 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3 .....	83
Tabela 29 – Comparativo redução Aceleração - Projeto Robusto de MTMD para os cenários 1, 2 e 3 .....	84
Tabela 30 – Terremotos Placa Tectônica Japão .....	86
Tabela 31 – Terremotos Placa Tectônica Califórnia – Parte 1 .....	87
Tabela 32 – Terremotos Placa Tectônica Califórnia – Parte 2.....	88
Tabela 33 – Terremotos Placa Tectônica Japão com PGA .....	89
Tabela 34 – Terremotos Placa Tectônica Califórnia com PGA Parte 1 .....	90
Tabela 35 – Terremotos Placa Tectônica Califórnia com PGA Parte 2.....	91
Tabela 36 – Dados Terremotos Placa Tectônica Califórnia.....	92
Tabela 37 – <i>Drift</i> x Terremotos x Cenário 1 .....	92
Tabela 38 – <i>Drift</i> x Terremotos x Cenário 2 .....	93
Tabela 39 – <i>Drift</i> x Terremotos x Cenário 3 .....	94
Tabela 40 - Valor médio e coeficiente de variação de cada variável aleatória de entrada.....	96
Tabela 41 – Configurações dos parâmetros da otimização .....	96
Tabela 42 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 <i>Drift</i> - 1º Modo 10.10.10.....	97
Tabela 43 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3 – <i>Drift</i> - 1º Modo 10.10.10	97
Tabela 44 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 <i>Drift</i> - 1º Modo 30.30.30.....	98
Tabela 45 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3 – <i>Drift</i> - 1º Modo 30.30.30	99
Tabela 46 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 <i>Drift</i> - 1º Modo 50.50.50.....	99
Tabela 47 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3 – <i>Drift</i> - 1º Modo 50.50.50 .....	100
Tabela 48 – <i>Drift</i> x Terremotos x Cenário 3 - 1º Modo 10.10.10.....	102

Tabela 49 – <i>Drift</i> x Terremotos x Cenário 3 - 1º Modo 30.30.30 .....	102
Tabela 50 – <i>Drift</i> x Terremotos x Cenário 3 - 1º Modo 50.50.50 .....	103

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADMF	Fator dinâmico de aceleração
ALS	Amortecedores de Líquidos Sintonizados
AMS	Amortecedor de Massa Sintonizado
BH-TMD	<i>Tuned Mass Damper Bidirectional and Homogeneous</i>
BOA	<i>Butterfly Optimization Algorithm</i>
BSA	<i>Backtracking Search Optimization Algorithm</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DDMF	Fator Dinâmico de Deslocamento
<i>DRIFT</i>	Deslocamento Relativo entre Andares
EA	Algoritmo evolutivo
FA	<i>Firefly Algorithm</i>
FEMAP-1050	Disposições sísmicas recomendadas pelo NEHRP
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
GMAp	Grupo de Mecânica Aplicada
GSHAP	<i>The Global Seismic Hazard Assessment Program</i>
GWO	<i>Grey Wolf Optimizer</i>
HMD's	<i>Hybrid Mass Dampers</i>
HS	<i>Harmony Search Algorithm</i>
Hz	Hertz
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LB	<i>Lower Bound</i> – Limite Inferior para as Variáveis de Projeto
LHS	<i>Latin Hypercube Sampling</i>
MCER	Nível de Movimento de Solo Máximo Considerado para Terremoto
MDOF	<i>Multiple Degree of Freedom</i>
MMS	Escala de Magnitude de Momento
MTMD	<i>Multiple Tuned Mass Dampers</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
NMA	<i>Nelder-Mead Algorithm</i>

NEHRP	<i>Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures</i>
NSR	<i>Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente</i>
NTMD	<i>Number of Multiple Tuned Mass Dampers</i>
PGA	<i>Peak Ground Acceleration</i>
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RPM	Rotações por Minuto
SGA	<i>Search Group Algorithm</i>
SDOF	<i>Single Degree of Freedom</i>
TLCD	<i>Tuned Liquid Column Damper</i>
TMD	<i>Tuned Mass Damper</i>
UB	<i>Upper Bound</i> – Limite Superior para as Variáveis de Projeto
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
WOA	<i>The Whale Optimization Algorithm</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Expoente de Potência
$a_0$	Constante dos parâmetros do método de Newmark
$a_1$	Constante dos parâmetros do método de Newmark
$a_2$	Constante dos parâmetros do método de Newmark
$a_3$	Constante dos parâmetros do método de Newmark
$a_4$	Constante dos parâmetros do método de Newmark
$a_5$	Constante dos parâmetros do método de Newmark
$a_6$	Constante dos parâmetros do método de Newmark
$a_7$	Constante dos parâmetros do método de Newmark
$\vec{a}$	Componentes Linearmente Diminuídos ao Longo das Iterações
$\vec{A}$	Vetor coeficiente
$b$	Constante para definir a forma da espiral logarítmica
$c$	Modalidade Sensorial
$\vec{C}$	Vetor coeficiente
$[C]$	Matriz de amortecimento do sistema
$c_d$	Matriz de amortecimento do TMD, kNs/m
$C_{TMD}$	Amortecimento do TMD, kNs/m
$D$	Comportamento dos lobos
$dt$	Incremento de tempo, s
$e$	Multiplicação elemento por elemento
$f$	Magnitude percebida da fragrância
$f_i$	Fragrância da $i$ -ésima borboleta
$f(x)$	Função Objetivo
$F(t_0)$	Força inicial
$F(x)$	Maximização de uma função
$-F(x)$	Minimização de uma função
$g^*$	Melhor solução atual
$g_j(x)$	Restrição de Projeto
$h_{k(x)}$	Restrição de Projeto
$h_{si}$	Distância entre as duas elevações correspondentes



$h_{sx}$	Distância entre as duas elevações correspondentes ao pavimento em questão
$I$	Fatores de importância de utilização das edificações
$I$	Intensidade de Estímulo
$k$	Rigidez de cada andar, kN/m
$k_d$	Matriz de rigidez do TMD, kN/m
$[K]$	Matriz de rigidez do sistema
$K_{TMD}$	Rigidez do TMD, kN/m
$l$	Número aleatório em $[-1,1]$
$m$	Massa de cada andar, kg
$[M]$	Matriz de massa do sistema
$M_d$	Matriz de massa do TMD, kg
$m_s$	Massa da estrutura, kg
$m_T$	Massa do TMD, kg
$npTMD$	Possíveis posições para o amortecedor de massa sintonizado
$nTMD$	Número máximo de dispositivos (TMD) a serem instalados na estrutura
$\vec{P}$	Posições dos amortecedores de massa sintonizado na estrutura
$p$	Número aleatório em $[0,1]$
$r$	Número aleatório em $[0,1]$
$r_1$	Vetor aleatório entre $[0,1]$
$r_2$	Vetor aleatório entre $[0,1]$
$S(w)$	densidade espectral de potência
$S_0$	densidade espectral constante
$t$	Tempo, s
$ta$	Tempo da iteração atual
$U$	Distribuição uniforme
$x$	Variável de projeto
$\vec{X}$	Vetor posição de um lobo cinza
$\vec{\ddot{x}}_g$	Aceleração do solo, $m/s^2$
$\overrightarrow{X_{rand}}$	Vetor de posição aleatória
$\vec{\dot{x}}(t_0)$	Velocidade inicial, m/s
$\vec{\ddot{x}}(t_0)$	Aceleração inicial, $m/s^2$
$\vec{\ddot{x}}(t_i)$	Aceleração no tempo $t$ , $m/s^2$

$\vec{\dot{x}}(t_i)$	Velocidade no tempo t, m/s
$\vec{\ddot{x}}(t_{i+1})$	Aceleração no tempo t+ $\Delta t$ , m/s <sup>2</sup>
$\vec{\dot{x}}(t_{i+1})$	Velocidade no tempo t+ $\Delta t$ , m/s
$\vec{x}(t)$	Deslocamento do sistema, em função do tempo, m
$\vec{\ddot{x}}(t)$	Aceleração do sistema, em função do tempo, m/s <sup>2</sup>
$\vec{\dot{x}}(t)$	Velocidade do sistema, em função do tempo, m/s
$\vec{x}(t_0)$	Deslocamento inicial, m
$\vec{x}(t_i)$	Deslocamento no tempo t, m
$\vec{x}(t_{i+1})$	Deslocamento no tempo t+ $\Delta t$ , m
$\vec{\ddot{x}}_g(t)$	Aceleração do solo em função do tempo, m/s <sup>2</sup>
$x_i^t$	Vetor de solução xi da i-ésima borboleta na iteração número t
$x_j^t$	jth borboletas do espaço de solução
$x_k^t$	kth borboletas do espaço de solução
$\vec{X}_p$	Vetor de posição da presa
$X_\alpha$	Melhor agente de pesquisa
$X_\beta$	Segundo melhor agente de pesquisa
$X_\delta$	Terceiro melhor agente de pesquisa
$w_g$	Frequência natural do solo, rad/s
$w$	Frequência, rad/s
$\alpha$	Lobo alfa
$\beta$	Lobo Beta
$\zeta_g$	Amortecimento natural do solo
$\Delta t$	Intervalo de tempo, s
$\Delta x$	deslocamentos relativos de um pavimento x, m
$\bar{\zeta}_x$	Deslocamentos absolutos nas elevações, m
$\alpha_N$	Parâmetro para estabilidade do método de Newmark
$\delta_N$	Parâmetro para estabilidade do método de Newmark
$\alpha$	Lobo alfa
$\delta$	Lobo delta
$\mu$	Relação de massas
$\omega$	Lobo ômega

$\in$	Sinal de Pertence
$\infty$	Infinito

## 1 INTRODUÇÃO

As ações dinâmicas são um fator de grande relevância na concepção do projeto de estruturas, pois muitas vezes estas ações são as responsáveis por seu colapso. Entre as diversas ações dinâmicas podem-se citar equipamentos em funcionamento, movimentação de pessoas, movimentação de veículos, ação do vento, tremores de terra, entre outras. Independentemente da ação dinâmica a qual a estrutura estará suscetível, para fins de análise dinâmica, a excitação pode ser determinada efetuando a medição da aceleração gerada pela excitação em estruturas existentes ou fazendo a geração de excitação através de métodos teóricos / numéricos e posterior simulação numérica para determinação da resposta do sistema.

A evolução das propriedades dos materiais de construção e das diretrizes de cálculo tem permitido projetar seções estruturais com melhor aproveitamento, e conseqüentemente estruturas mais leves e esbeltas. Apesar da economia, a rigidez da estrutura é menor, o que a torna mais sensível a problemas de vibração quando submetidas a ações dinâmicas. Desta forma cada vez mais são necessárias análises com maior complexidade e verificações mais criteriosas.

Para controlar e reduzir as amplitudes de vibração destas estruturas, projetistas e engenheiros buscam encontrar soluções para a dissipação da energia, evitando o colapso ou danos nas estruturas. A procura por soluções vai desde o desenvolvimento de novas técnicas ou dispositivos que visam à redução das amplitudes de vibrações de forma confiável, quanto à otimização dos dispositivos já desenvolvidos atualmente visando a busca de melhores resultados e menor custo benefício.

Com o objetivo de controlar estas vibrações, diversas opções são possíveis, desde a alteração da estrutura quanto à massa e à rigidez a qual geralmente é feita em fase de projeto, como a implantação de dispositivos externos como, por exemplo, sistemas ativos, semi-ativos e passivos (sendo os mais utilizados os amortecedores de massa sintonizados (TMD) os quais são sistemas de controle passivos), usualmente utilizados para adequação de estruturas já existentes. O TMD possui diversas vantagens, tais como, grande capacidade de redução da amplitude de vibração, fácil instalação, pouca manutenção, baixo custo, entre outras.

Os sistemas de controle de vibrações tem sido objeto crescente de estudo por pesquisadores. No entanto, qual o melhor sistema a utilizar é um desafio constante. Que tipo de dispositivo adotar, qual a posição dos mesmos, assim como quais os melhores parâmetros a adotar frente às incertezas e diferentes funções objetivo.

## 1.1 Motivação

A principal motivação deste trabalho é estudar dois grandes temas dentro da engenharia que são de extrema importância: a dinâmica estrutural aliada à otimização.

Conforme posto anteriormente, a área de dinâmica estrutural vem ganhando cada vez mais atenção, e hoje em dia é fundamental que as estruturas sejam verificadas quanto a carregamentos dinâmicos. A utilização de sistemas de controle de vibrações para reduzir as amplitudes causadas pelas ações dinâmicas é um campo que tem crescido muito atualmente e dentro destes sistemas de controle, os TMDs são um dos mais utilizados na prática.

Entretanto, apesar de já ser conhecido que o uso de dissipadores de energia reduz as amplitudes de vibração, ainda é difícil de determinar os parâmetros ótimos de cada amortecedor, bem como, a quantidade e posição ideal destes dissipadores. Portanto, paralelamente ao tema de dinâmica estrutural, para utilizar os dispositivos de forma econômica e ao mesmo tempo eficaz, é interessante unir este tema com o de otimização estrutural, tema no qual também se tem investido muito em pesquisa atualmente. Adicionalmente, não basta simplesmente realizar uma otimização sem considerar as incertezas presentes tanto na estrutura quanto na excitação. Desta forma, a otimização robusta vem se tornando cada vez mais importante, fazendo com que o projeto otimizado não seja sensível a pequenas variações nos parâmetros.

## 1.2 Objetivos

Neste contexto, de acordo com o apresentado na introdução e motivação, o objetivo principal desta tese é propor uma metodologia para projeto ótimo robusto de múltiplos amortecedores de massa sintonizados (MTMD) para controlar vibrações de edifícios submetidos a excitações sísmicas. Diferente da maioria dos trabalhos de otimização existentes, a presente tese propõe uma otimização robusta, ou seja, a metodologia desenvolvida permite levar em consideração as incertezas presentes na estrutura, na excitação aleatória e também nos próprios parâmetros dos MTMD.

Para atingir o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos precisam ser alcançados ao longo do trabalho:

1. Desenvolver códigos computacionais para geração de sismos artificiais;
2. Desenvolver códigos computacionais para o dimensionamento de 1 TMD e de MTMD;
3. Desenvolver códigos computacionais para o cálculo da resposta dinâmica (tanto em termos de *Drift* quanto em termos de aceleração) de edifícios submetidos a excitações sísmicas antes e após a implantação de TMD's;
4. Refinar os códigos desenvolvidos levando em consideração as incertezas presentes tanto nas propriedades da estrutura, do TMD, quanto do carregamento sísmico, através de distribuição de probabilidade (lognormal);
5. Estudar e implementar algoritmos metaheurísticos que permitam lidar com as incertezas e os problemas de otimização;
6. Desenvolver rotina computacional para a escolha de número e posições de TMD's para avaliar a melhor configuração de distribuição visando a diminuição da resposta dinâmica da estrutura;
7. Desenvolver códigos computacionais para integrar as rotinas de otimização com as rotinas de determinação da resposta dinâmica, consolidando a metodologia de otimização robusta de TMD's;
8. Comparar e analisar os diferentes cenários simulados: um único TMD no topo, TMD's com distribuição vertical e horizontal;
9. Buscar sismos reais para a validação dos parâmetros do's TMD's;
10. Avaliar a eficácia da solução ótima obtida através da metodologia proposta em situações nas quais o edifício estudado é submetido a registros sísmicos reais.

### **1.3 Organização do Trabalho**

Nesta seção apresenta-se uma descrição do conteúdo da presente Tese, a qual está dividida em 6 capítulos, dos quais esta introdução é o primeiro.

Na sequência, o capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os sistemas de controle de vibrações em estruturas, dando-se ênfase aos sistemas passivos e mais especificamente aos TMD's, bem como a otimização de TMD's. É realizada uma revisão dos

trabalhos que implementam técnicas de otimização de dispositivos TMD's em estruturas submetidas as ações sísmicas.

Após a introdução e a revisão bibliográfica, o capítulo 3 expõe a fundamentação teórica, tratando das ações dinâmicas em estruturas, otimização, distribuição lognormal e *Latin Hypercube Sampling*.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta, abordando a formulação do problema com a explicação dos assuntos chave possibilitando o desenvolvimento desta Tese. Neste capítulo são expostos o procedimento como se obtém a resposta dinâmica da estrutura através da utilização do método de Newmark, a geração do sinal de excitação e a utilização do algoritmo de otimização para otimização robusta. Juntamente com as ferramentas utilizadas para a determinação da resposta dinâmica da estrutura, são apresentados os parâmetros aleatórios do edifício, o como se efetua o dimensionamento dos múltiplos TMDs. Também é apresentada a forma como é feita a validação dos parâmetros obtidos dos amortecedores para a validação através das Normas de limites de *Drift*, bem como, por sismos reais. Desta forma, neste capítulo é realizada a descrição da metodologia detalhadamente.

No capítulo 5 são expostos os resultados obtidos, juntamente com discussões e comparações entre os diferentes cenários e situações propostas. Para o caso de otimização robusta de amortecedores de massa sintonizados foi implementado um edifício de 10 andares modelado como *Shear Building*. Para a determinar a resposta estrutural antes e após a instalação dos amortecedores de massa sintonizada para os casos em estudo, foi desenvolvida uma rotina baseada no método de Newmark em MATLAB.

As conclusões acerca deste trabalho são apresentadas no capítulo 6, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sabe-se que a busca e o desenvolvimento de estruturas mais leves e esbeltas estão cada vez mais sendo implantadas, conseqüentemente a busca por dispositivos para o controle de vibrações devido às ações dinâmicas é crescente. No entanto, qual a melhor solução e dispositivo a adotar seguem sendo uma pergunta frequente.

Um sistema de controle de vibrações tem por objetivo reduzir as amplitudes de vibrações, através da instalação de dispositivos externos, aumentando o amortecimento da estrutura.

O desenvolvimento de dispositivos de amortecimento remonta ao início do século XX, quando Hermann Frahm inventou um dispositivo para amortecer vibrações em corpos, que foi patenteado, como apresentado por Frahm, 1909.

De acordo com Paredes, 2008 e Paredes e Barros, 2009, nas últimas três décadas, observa-se um grande desenvolvimento de técnicas para controle de vibrações devido as ações aleatórias, como o vento e os sismos, os quais são imprevisíveis.

Segundo Ospina, 2008, os sistemas de controle podem ser classificados em quatro categorias: passivo, ativo, semi-ativo e híbrido.

Sistemas ativos são utilizados quando se necessita da adaptação da estrutura a diferentes tipos de frequências. De acordo com a ação a qual a estrutura está submetida, o sistema de controle, através de sensores instalados na estrutura, é interligado a um sistema externo, o qual efetua o processamento e a verificação da melhor força e amortecimento para controle desta ação. Porém os sistemas ativos necessitam de monitoramento, energia e controle externo permanente para o bom desempenho. Esta energia e controle externo são feitos através de algoritmos, os quais são alimentados, por sensores instalados na estrutura. Estes algoritmos calculam e aplicam a força necessária para controlar ou anular as forças devidas as excitações. As forças são introduzidas na estrutura através de macaco hidráulico, motor elétrico, entre outros. Estes sistemas possuem a vantagem de adaptarem-se a diferentes tipos de cargas e ações, mas, demandam grande quantidade de energia para atuarem de forma a garantir a estabilidade à estrutura, podendo em muitos casos ocasionar a instabilidade da estrutura.

Segundo Ospina, 2008, são exemplos destes dispositivos os materiais inteligentes, amortecedores de massa ativos, contraventamento ativo, geradores de pulso, apêndices aerodinâmicos e os cabos tensionados.



Sistemas de controle passivos são dispositivos que não necessitam de energia externa para o bom desempenho. Segundo Ospina, 2008, estes dispositivos são dimensionados para um tipo de ação, e utilizam da própria movimentação da estrutura para dissipar a energia devida à ação dinâmica, convertendo a energia do movimento em calor. Desta forma, são vantajosos em relação aos sistemas ativos, por razões de custo, instalação, manutenção e facilidade de controle. Exemplos de sistemas passivos são os amortecedores de massa sintonizados, amortecedores de líquidos sintonizados, entre outros.

Os sistemas de controle passivos são considerados como um sistema de um grau de liberdade, no qual, quando interligados a estrutura serão compostos por um sistema de dois graus de liberdade, visando efetuar a avaliação e dimensionamento. Quando a estrutura possuir mais de um grau de liberdade, esta deverá ser transformada em um sistema equivalente a um grau de liberdade, para que o dimensionamento do sistema passivo seja eficaz e com bom desempenho.

Os sistemas semi-ativos, são uma solução intermediária entre os sistemas de controle ativos e passivos, não necessitando de fornecimento de energia externa ao sistema, devido a sua capacidade de ajustar-se frente às respostas da estrutura.

Os sistemas de controle semi-ativos, segundo Chaves, 2010, são chamados de “passivos inteligentes”. Os sistemas de controle semi-ativos buscam ultrapassar os problemas de alimentação dos sistemas ativos e os problemas de eficácia que os sistemas passivos por vezes apresentam.

Esta denominação é devida ao fato de que dissipam a energia conforme os sistemas passivos, através da movimentação da estrutura, no entanto, possuem maior adaptabilidade, pois têm a capacidade de se ajustarem de acordo com a resposta da estrutura, tais como os sistemas ativos. Exemplos deste dispositivo são os amortecedores de atrito variável, amortecedores de orifício variável, dentre outros, conforme Chaves, 2010, Ramos e Barros, 2005.

Uma combinação entre sistema ativo e passivo são os dispositivos híbridos, os quais os tornam mais eficientes e econômicos. Possuem tanto atuadores, como dissipadores de energia. O sistema ativo só entrará em funcionamento, quando a resposta da estrutura for superior a capacidade de dissipação de energia através do controle passivo. Uma grande vantagem sob o sistema de controle ativo é de que como parcela da energia é dissipada por um sistema passivo, a energia externa demandada em um sistema híbrido é menor comparada ao ativo, o que gera

uma redução considerável no custo, e uma maior confiabilidade. Outra vantagem deste dispositivo é que com a combinação de sistemas ativos e passivos, há uma amplificação na faixa de frequência de atuação do dispositivo, gerando um melhor desempenho.

No caso de falta de energia, o seu componente passivo ainda oferece certo grau de proteção à estrutura. Portanto, supre as principais desvantagens dos controles passivo e ativo isoladamente. [Ospina, 2008].

Neste grupo os mais conhecidos são os HMD's ("*Hybrid Mass Dampers*") que fazem uma combinação de TMDs com sistemas ativos, através da exploração do efeito passivo dos TMDs e a implementação de um sistema ativo paralelo que aumenta o desempenho do aparelho, aumentando o movimento da massa passiva e aumentando a robustez do dispositivo em face de problemas de sintonização [Chaves, 2010].

Os sistemas de controle passivos são utilizados para controle de uma frequência de excitação em específica, Paredes, 2008. Os sistemas de controle semi-ativos possuem a capacidade de adaptar as suas características a cada ação dinâmica, porém tendo a limitação e continuando com a essência dos sistemas passivos.

Recentemente, um rápido aumento no desenvolvimento e aplicação de dispositivos de dissipação de energia passiva ocorreu. Na Tabela 1 são apresentados diversos autores para cada um dos tipos de amortecedores classificados como sistemas de controle passivos, tais como, isolamento de bases, amortecedores viscoelásticos, amortecedores de fricção e amortecedores de massa sintonizados.

Os sistemas de controle passivos são projetados para minimizar a resposta estrutural sob ação dinâmica sem usar uma fonte de energia externa. Portanto, existem várias vantagens sobre sistemas ativos e semi-ativos, como baixo custo de instalação e manutenção, grande capacidade de reduzir as amplitudes de vibração, entre outros. Os TMDs são divididos em quatro categorias: TMD convencional, TMD pendular, TMD bidirecional e homogênea (BH-TMD) [Almazán et al., 2007] e amortecedores de coluna líquida sintonizados (TLCDs) [Mondal et al., 2014].

O TMD considerado neste trabalho é convencional, sendo um dispositivo de controle passivo o qual consiste em uma massa, uma mola e um amortecedor viscoso ligado a um sistema vibratório para reduzir as vibrações indesejáveis. Na Tabela 1 são apresentados alguns trabalhos desenvolvidos com sistema de controle de vibrações.

Tabela 1 – Bibliografia de tipos de sistemas de controle

<b>Tipo de sistema</b>	<b>Autores</b>	
Isolamento de bases	Dolce et al., 2007	
Amortecedores viscoelásticos	Xu et al., 2004	Xu, 2007
Amortecedores de fricção	Filiatrault, 1985	Miguel et al., 2018
	Miguel et al., 2008	Min et al., 2010
	Miguel et al., 2014	Pérez et al., 2017a
	Miguel et al., 2015	Pérez et al., 2017b
	Miguel et al., 2016a	Qu et al., 2001
	Miguel et al., 2016b	
Amortecedores de massa sintonizados	Abé et al., 1994	Marano et al., 2010
	Arfiadi et al., 2011	Miguel et al., 2013
	Bae et al., 2018	Miguel et al., 2016c
	Brzeski et al., 2014	Miguel et al., 2016d
	Chen et al., 2001	Mohebbi et al., 2013
	Dehghan et al., 2010	Mohtat et al., 2011
	Desu et al., 2006	Sánchez et al., 2018
	Elias et al., 2018	Soto et al., 2013
	Farghaly et al., 2012	Vellar et al., 2016
	Farshi et al., 2011	Wang et al., 2009
	Ghosh et al., 2007	Warnitchai et al., 2006
	Hoang et al., 2008	Wu et al., 2016a
	Lavan et al., 2013	Wu et al., 2016b
	Lee et al., 2006	Wu et al., 2018
Li et al., 2006	Xu et al., 1992	
Luo et al., 2017	Zuo et al., 2005	

Segundo Nagahama, 2013, estes sistemas podem ser compostos por um ou mais dispositivos independentes. Quando os dispositivos são independentes, são denominados TMD, já quando são compostos por mais de um dispositivo, sendo múltiplos TMD, são denominados MTMD.

Devido ao desempenho dos amortecedores de massa sintonizados para reduzir a resposta de estruturas a excitações harmônicas ou aleatórias, um grande número de TMDs foi instalado em prédios altos para reduzir as vibrações induzidas pelo vento: como a torre John Hancock de 244m de altura em Boston com um TMD dois blocos de chumbo e aço de 270.000 kg, assim como, o *Citicorp Center Office Building* de 280 m de altura em Nova York, com um TMD usando um bloco de concreto de 360.000 kg, e o *Terrace on the Park Building* em Nova York, onde foi instalado um TMD para reduzir a vibração induzida pela dança [Sadek et al., 1997].

Segundo Moutinho, 2007, as estruturas podem melhorar seu desempenho estrutural com a implementação de sistemas de controle de vibrações, podendo estes serem ativos; semi-ativos; passivos; ou híbridos, fazendo com que os níveis de vibração sejam reduzidos para limites aceitáveis estabelecidos de acordo com normas ou critérios de segurança. A escolha da técnica a adotar depende de vários fatores, tais como, a complexidade da estrutura e do sistema de controle, a natureza das ações exteriores, a confiabilidade e robustez do sistema, bem como, seu custo.

Para o bom funcionamento de máquinas rotativas e o bom desempenho de estruturas sem danos, um dos critérios de segurança é a ISO 2372, 1974, a qual estabelece limites de vibração que dependem da potência da máquina e do tipo de fundação. As vibrações são medidas em pontos das superfícies das máquinas que operam com frequência na faixa de 10 a 1000Hz, e são classificadas quanto à classe do equipamento versus as velocidades de severidade de vibração em mm/s.

Srinivasulu e Vaidyanathan, 1976, é outra referência quanto aos critérios de segurança disponível na literatura, a qual fornece uma classificação mais simples de limites de amplitudes de vibrações para diversos tipos de máquinas. A classificação é dividida em: máquinas de baixa velocidade (até 500rpm), fundações de martelos e máquinas de alta velocidade (dividida em duas velocidades 3000rpm e 1500rpm, sendo subdivididas em vibrações verticais e horizontais). A limitação da vibração se dá pela amplitude permissível em cm para cada uma das opções listadas acima.

O *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente* NSR-10 (AIS,2010) é uma Norma com critérios para a segurança e integridade das estruturas de construções, que classifica a intensidade da atividade sísmica a partir da qual se determinam as características de solicitação da estrutura. O *Reglamento* considera quais estruturas devem permanecer em perfeitas condições e quais podem sofrer algum dano durante e depois de um terremoto.

## **2.1 Amortecedor de Massa Sintonizado (TMD)**

A invenção de sistemas de amortecimento de vibrações foi proposta em 1909, pelo engenheiro do império alemão, Hermann Frahm, o qual patenteou seu invento em 1911, conforme Frahm,1911. Frahm criou o primeiro TMD, o qual foi constituído por elementos de rigidez e de massa, sem amortecimento. Este sistema de controle foi criado devido as vibrações

que surgem em organismos sujeitos a impactos periódicos. As vibrações foram por ele denominadas de “vibrações de ressonância”, sendo estas provenientes de navios submetidos a forças periódicas de propulsão ou de suas hélices. Não se limitando somente a navios, mas também a toda e qualquer estrutura, como aviões, veículos ferroviários, veículos rodoviários, edifícios com equipamentos trabalhando em seu interior, bem como, veículos passando perto destes edifícios. Na qual estas vibrações podem tornar o mesmo insuportável ou tornar a execução de trabalho impossível.

O amortecedor de massa sintonizado (TMD) é um dispositivo passivo de controle de vibrações, composto por uma massa, ligado à estrutura através de uma mola e um amortecedor. O TMD é usualmente instalado no topo da estrutura com o objetivo de atenuar as vibrações devidas ao primeiro modo que é geralmente o de maior predominância na ocorrência na geração de problemas em estruturas. A frequência natural do TMD é sintonizada em torno da frequência do primeiro modo de vibração. Quando a estrutura vibra, o TMD vibra com a mesma frequência e absorve parte da energia do sistema. Desta forma, a estrutura terá outra frequência natural, deixando de estar na faixa de frequência de vibração da excitação e ocorrência de ressonância, assim a resposta da estrutura em termos de deslocamentos e acelerações é reduzida. Em virtude de os sistemas de controle passivos não serem capazes de eliminar uma ampla faixa de frequências com um único dispositivo, estes são classificados como limitados, de acordo com Rasid et al. (2019).

Conforme Holmes, 2004, o sistema de controle passivo funciona absorvendo a energia de vibração através de uma massa secundária acoplada a massa principal por amortecedores viscosos.

Desde a invenção desenvolvida por Frahm, muitas pesquisas estão sendo feitas para investigar a eficácia dos TMD para diferentes aplicações de cargas dinâmicas. A aplicação de TMD em máquinas e motores de veículos automotivos e aéreos já existe há muito tempo, no entanto, começou a ser aplicado para controle de vibrações em estruturas civis submetidas ao vento em meados de 1980, conforme Tanaka e Mak, 1983.

Bekdas e Nigdeli, 2011 citam a aplicação de um TMD do tipo pêndulo no topo do edifício Taipei 101 em Taiwan.

Soong e Dargush, 1997, durante anos realizaram uma extensiva pesquisa para o sistema de controle passivo através de TMD visando o controle de vibrações em estruturas lineares e não lineares submetidas a excitações de cargas de vento e terremotos.

Devido ao inconveniente do grande valor e tamanho da massa do TMD, Xu e Igusa, 1992, propuseram a aplicação de múltiplos TMD (MTMD), sendo cada um dos TMDs instalados individualmente, reduzindo o espaço e a carga em um único local e garantindo a sintonização de cada TMD a um modo em específico.

O desempenho do TMD depende de seus parâmetros, como, massa, rigidez e amortecimento, na qual diversos métodos estão sendo pesquisados e propostos para determinação dos valores ótimos visando a obtenção da melhor resposta da estrutura. Os métodos variam conforme os critérios de concepção. Alguns métodos são baseados na relação de massas levando em consideração a frequência natural e razão de amortecimento da estrutura e do TMD, já outros métodos utilizam-se de uma faixa de relação de massas, rigidez e amortecimento, diretamente.

Um único TMD pode ser eficaz na redução da resposta da estrutura submetida a excitações externas, mas muitas vezes a sintonização da frequência do TMD gera alguns inconvenientes, como por exemplo, quando estruturas estão submetidas ao vento e a terremotos, devido à dificuldade de sintonização da excitação com a frequência natural da estrutura. Desta forma há a possibilidade de instalação de diversos TMD (MTMD), no qual cada TMD será sintonizado a uma frequência específica da estrutura.

Uma das desvantagens na aplicação prática de um TMD, é quando a massa necessária para a redução da resposta da estrutura for relativamente grande, o que demanda um espaço considerável para instalação, bem como, a estrutura deverá suportar esta massa como uma carga adicional. Outra desvantagem de um único TMD é de que a frequência de sintonização se dá somente para um modo, geralmente o primeiro, o que por consequência acarreta em não controlar os modos mais elevados da estrutura.

Conforme Xu e Igusa, 1992, o uso de MTMD com a sintonização de frequências naturais diferentes e distribuídas com pequenos intervalos pode ser mais eficaz do que um único TMD. Enquanto um único TMD é instalado geralmente no topo da estrutura, os múltiplos TMD podem ser instalados em diferentes configurações, podendo ser instalados em paralelo, em série, em um único andar, ou distribuídos ao longo dos andares de um edifício.

Para verificação do desempenho e eficácia dos MTMD frente às excitações de vento e terremoto, Kareem e Klein, 1995, concluíram que o desempenho depende do número total de TMD, distribuição destes TMD ao longo da estrutura, a respectiva taxa de amortecimento e das frequências adotadas para o dimensionamento dos MTMD.

Conforme Battista, 2004, um sistema de múltiplos TMD foi instalado na Ponte Rio-Niterói para evitar grandes amplitudes de oscilações induzidas por desprendimento de vórtices causado por ventos com velocidades relativamente baixas. A estrutura da ponte é composta por vigas metálicas tipo caixão de pequena esbeltez, possuindo extensão de 13,3km, sendo a ponte com o maior vão do mundo (300 metros), a qual apresentava um comportamento aeroelástico no vão central. Com a incidência de ventos da ordem de 55 a 60km/h ocorriam oscilações com a amplitude de 60cm para baixo e 60cm para cima. Apesar de não oferecer risco à estrutura, a incidência do vento causava muito desconforto aos usuários. Para controle dinâmico, reabilitação da funcionalidade da ponte, além de segurança e conforto dos usuários, foram implantados TMDs na estrutura da ponte, desenvolvido através de um modelo matemático do problema aeroelástico, combinado com resultados de medições experimentais e técnicas de otimização. O desempenho do sistema implantado é verificado através de medições experimentais e comparações com os resultados numéricos obtidos para respostas da estrutura original e controlada. Um vídeo ilustrativo do problema e solução pode ser visto através do link: <https://www.youtube.com/watch?v=mOsazjJkqCc>.

TMDs foram instalados em prédios altos para redução das vibrações devidas ao vento e dança. Como exemplo cita-se: a torre John Hancock de 244 metros de altura em Boston, com TMD composto por dois blocos de chumbo e aço de  $2,7 \times 10^5$ kg; O *Citicorp Center* prédio de escritórios de 280 metros de altura em Nova Iorque com um TMD composto por um bloco de concreto de  $3,6 \times 10^5$ kg, ambos para vento. Para controle de vibrações devidas à dança cita-se o TMD instalado no *Terrace on the Park Building* na cidade de Nova Iorque.

A eficiência de um TMD pode ser feita através da razão de seu amortecimento efetivo, conforme Tanaka e Mak, 1983.

A eficiência do sistema de controle de vibrações por TMD são influenciados pelos parâmetros estruturais: razão de massa do TMD e massa da estrutura (razão de massa), razão de frequências a qual é a taxa de sintonia de frequências entre o sistema e o TMD. A obtenção da razão de massas é feita através da massa do TMD frente a massa total da estrutura.

Warburton, 1982 utiliza valores para a relação de massas de 0,01 a 0,2, ou seja, estipula o limite superior em 20% para a massa do TMD quando comparada à massa da estrutura.

Sadek et al., 1997, adotam limites mínimo e máximo para a relação de massas variando de 0 a 0,15, com incremento de 0,005.

Estudos mais recentes como o de Ferreira, 2008, consideram valores para a relação de massas de 0,005 a 0,01. Sabe-se que quanto maior a relação de massas entre o TMD e a estrutura, maior será o valor da massa do TMD. No entanto, o valor da massa do TMD não é interessante que seja um valor muito alto, visto que acarretará em carga adicional à estrutura em análise, tornando-se inviável, devido ao custo e à dificuldade de implantação.

Um único TMD tem um bom desempenho na redução da resposta dinâmica de uma estrutura sob excitação externa quando o dispositivo é sintonizado no primeiro modo de vibração da estrutura [Vellar et al., 2016]. No entanto, isso é uma desvantagem porque o dispositivo tem baixo desempenho, controlando a resposta dos modos de vibração superiores da estrutura. Uma solução simples para superar essas deficiências é a instalação de *Multiple Tuned Mass Dampers* (MTMD) na estrutura.

O desempenho do MTMD depende de seus parâmetros como massa, rigidez e amortecimento.

No entanto, determinar o número de dispositivos a serem instalados e a melhor posição na estrutura, bem como, os parâmetros ideais em termos de rigidez e constante de amortecimento para cada TMD, é um problema de grande interesse para o engenheiro projetista.

Para resolver o problema mencionado acima, os algoritmos de otimização são usados para minimizar uma função objetivo e encontrar uma solução ótima do problema.

## 2.2 Otimização de TMDs

Na busca dos melhores parâmetros para a implantação de amortecedores de massa sintonizados e redução da resposta em sistemas e estruturas, diversos autores vêm desenvolvendo estudos baseados em otimização.

Li, 2002, estudou a performance de cinco combinações diferentes dos parâmetros do TMD (massa, rigidez e amortecimento) enquanto o critério de otimização tem sido maximizar o fator dinâmico de deslocamento (DDMF) e maximizar o fator dinâmico de aceleração (ADMF) em uma estrutura submetida a aceleração do solo.

Lee et al., 2006, desenvolveram um método numérico para a determinação de maneira sistemática dos parâmetros ideais dos TMDs submetidos a sismos gerados pelo método de Kanai e Tajimi, submetidos a ventos gerados pelo espectro de Davenport e submetido ao sismo



El Centro. Conforme o aumento do número de iterações, o método convergiu com maior eficácia.

Conforme Mohebbi et al., 2013, nas pesquisas anteriores sobre os sistemas de TMDs diferentes objetivos foram considerados em MTMD projetando como minimizar o deslocamento de estado estacionário do sistema principal, sob excitação harmônica (Jangid, 1999); minimizando a aceleração máxima da estrutura sob uma carga sísmica estocástica (Chen e Wu, 2001); minimização do DDMF e ADMF (Li, 2002); um índice de desempenho quadrático (Hoang e Warnitchai, 2005); otimizando MTMD usando um método de otimização baseado em gradiente para minimizar o deslocamento máximo da estrutura principal sob excitação harmônica (Li e Ni, 2007); entre outros.

Mohebbi et al., 2013, utilizaram um modelo estrutural tipo *shear building* e o algoritmo genético para a otimização dos parâmetros ótimos de TMDs com a estrutura submetida a sismos e objetivando a redução da resposta da estrutura. Neste estudo, os autores concluíram o aumento da eficácia dos dispositivos quanto maior for a massa do TMD frente a massa da estrutura. No entanto, quando o estudo foi feito com múltiplos TMDs, este não melhorou consideravelmente a resposta ao aumentar o número de dispositivos.

Os resultados obtidos por Farshidianfar e Soheili, 2013, mostraram que as características do solo influenciam na resposta da estrutura quando estudaram a influência da otimização dos parâmetros do TMD para minimizar as vibrações em edifícios altos causadas por sismos terrestres.

De acordo com Miguel, 2016, Joshi e Jangid realizaram um estudo para determinar os parâmetros ótimos de MTMD em estruturas SDOF submetidos a uma excitação de base, que é modelado como um processo aleatório estacionário de ruído branco. Hadi e Arfiadi, discutiu a projeção ótima dos TMD individuais em estruturas MDOF submetidos à excitação sísmica. Chen e Wu apresentaram um estudo focado no posicionamento ideal de MTMD em estruturas sujeitas a excitações sísmicas. Bandivadekar e Jangid empregaram uma técnica de busca numérica para otimizar os parâmetros de MTMD para suprimir a resposta dinâmica de um sistema amortecido SDOF principal sujeito a excitação harmônica.

Bekdas e Nigdeli, 2017, realizaram um estudo sobre a influência dos efeitos da interação solo-estrutura na definição dos parâmetros dos amortecedores de massa sintonizados com dois algoritmos de otimização em estruturas submetidas a diferentes terremotos. Os autores consideraram duas possibilidades de estruturas: sendo a primeira delas com um grau de

liberdade, a qual o efeito da interação solo estrutura não apresentou diferença na resposta da estrutura. No entanto, ao considerar a estrutura com mais graus de liberdade, a resposta desta estrutura apresentou resultados diferentes para cada tipo de solo. Desta forma, os autores concluíram que para a determinação dos parâmetros do TMD com a utilização dos algoritmos de otimização, se faz necessário considerar o tipo de solo a qual a estrutura estará sujeita.

Elias e Matsagar, 2018, concluíram que o uso de múltiplos TMD apresentam uma resposta melhor da estrutura quando comparado a utilização de um único TMD. Além da melhor resposta concluem que o espaço necessário para a instalação de múltiplos TMD é menor quando comparado a um único TMD no topo da estrutura.

Segundo Miguel et al., 2016, poucos artigos são encontrados abordando projeto robusto, considerando a incerteza nos parâmetros do sistema ou do TMD para controle de vibração estrutural. Mesmo considerando os recentes desenvolvimentos, as perguntas ainda surgem, principalmente em função da otimização global de MTMD e sua melhor configuração na estrutura, incluindo a distribuição horizontal e vertical. Os autores consideram a utilização de dois algoritmos de otimização para a determinação dos parâmetros ótimos do TMD, sendo o Algoritmo *Firefly* usado na parte estocástica, ou seja, na busca global de otimização, e o *Nelder-Mead Algorithm* (NMA) usado na busca local, para acelerar a busca da convergência, reduzindo o tempo computacional.

Mohebbi et al. 2013 ainda citam que embora em pesquisas anteriores diferentes funções objetivo foram consideradas a serem minimizadas, em todas as pesquisas, o objetivo principal tem sido a melhoria do desempenho da estrutura em relação aos critérios de segurança e manutenção. Mohebbi et al., 2013, utilizam algoritmos genéticos (GAs) para a busca dos parâmetros ótimos de múltiplos TMD, na busca de atenuar a resposta sísmica de estruturas.

Hadi, 1998, busca os parâmetros ótimos de um TMD para uma estrutura de múltiplos graus de liberdade submetida a excitação sísmica através do algoritmo genético (GA).

Bekdas et al., 2011 estimam os parâmetros ótimos como massa, rigidez e amortecimento de um amortecedor de massa sintonizado (TMD), a ser instalado no topo da estrutura, através da utilização do algoritmo *Harmony Search* (HS), para uma estrutura sujeita a excitação sísmica.

Marano et al., 2008 consideraram um critério de projeto otimizado robusto para um único dispositivo TMD no controle de vibrações estruturais de um sistema principal sujeito a cargas dinâmicas estocásticas, a qual é representada por um processo de ruído branco

estacionário. Os autores consideraram não apenas os parâmetros mecânicos em relação à estrutura e TMD, mas também os conteúdos espectrais de entrada sendo afetados pela incerteza. Desta forma, caracterizaram o problema com todos os parâmetros incertos e estatisticamente independentes com valor médio nominal e variância. A robustez é formulada como um problema de otimização multiobjetivo, no qual tanto a média quanto os desvios padrão são minimizados. Os autores concluem que as comparações com uma abordagem convencional baseada na mesma função objetivo mostram que a abordagem robusta induz uma melhoria significativa na estabilidade de desempenho.

Para resolver o problema mencionado acima, os algoritmos de otimização são usados para minimizar uma função objetivo e encontrar uma solução ótima do problema. Por outro lado, é bem conhecido que, em um problema de engenharia, há um alto número de incertezas envolvidas. Isso leva a representar essas incertezas através de funções de distribuição de probabilidade e envolvê-las no processo de otimização de amortecedores passivos. Assim, o processo de otimização torna-se mais complexo e é necessário implementar uma metodologia de otimização capaz de lidar com problemas dinâmicos que envolvem incertezas nas propriedades estruturais, nas propriedades dos MTMD e na carga sísmica.

Portanto, nesta tese se dará ênfase aos sistemas passivos com otimização robusta tanto do sinal de excitação aleatória, quanto aos parâmetros da estrutura e parâmetros dos TMDs, os quais ainda apresentam uma carência de estudos e aplicações em estruturas, principalmente no Brasil. Adicionalmente, os poucos estudos encontrados na literatura sobre a aplicação de sistemas passivos em estruturas não levam em conta a otimização simultânea de seus parâmetros, posições e quantidades de dispositivos.

Assim, este trabalho apresenta uma metodologia de otimização sob incerteza para determinar os parâmetros ótimos dos MTMD e suas melhores posições em um único estágio, ou seja, simultaneamente, em edifícios sujeitos a terremotos, visando melhorar a resposta estrutural dinâmica em termos de minimização do máximo *Drift*.

Neste contexto, este trabalho apresenta cenários diferentes para a otimização robusta em busca da melhor resposta para a estrutura quando sujeita a carga sísmica. Os cenários apresentados alternaram entre um único TMD instalado no topo da estrutura, ou as diferentes distribuições de múltiplos TMDs com distribuição horizontal e vertical.

É interessante destacar que o problema de otimização proposto no presente trabalho é complexo, devido a: (i) ser um problema de otimização de um sistema dinâmico que envolve

incertezas, (ii) é um problema de otimização de variável mista, isto é, que envolve variáveis discretas (posição de cada TMD) e contínuas (parâmetros de cada TMD) ao mesmo tempo, e (iii) sua função objetivo não é convexa.

Consequentemente, o problema de otimização sob incerteza dos MTMD proposto neste trabalho deve ser resolvido com a ajuda de métodos de otimização capazes de lidar com a complexidade deste problema. Neste caso, o mais apropriado é a implementação de uma técnica de otimização metaheurística e algumas de suas vantagens mais importantes são: (i) elas não requerem informações de gradiente, (ii) elas não ficam presas em mínimos locais se forem ajustadas corretamente, (iii) podem ser aplicados a funções objetivo não-convexas ou descontínuas, (iv) fornecem um conjunto de soluções ótimas e (v) podem ser implementadas para resolver problemas de otimização de variáveis mistas [Miguel et al., 2012; Miguel et al., 2013].

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Ações Dinâmicas em Estruturas

As ações dinâmicas são um fator de grande relevância na concepção do projeto de estruturas. Muitas vezes estas ações são as responsáveis por seu colapso. Entre as diversas ações dinâmicas podem-se citar equipamentos em funcionamento, movimentação de pessoas, movimentação de veículos, ação do vento, tremores de terra, entre outras. Independentemente da ação dinâmica a qual a estrutura estará suscetível, há duas maneiras de determinar os efeitos destas ações, onde uma é efetuando a medição da aceleração gerada pela excitação em estruturas existentes (acelerogramas), e como uma segunda opção é a geração de excitação através de métodos numéricos, ou seja, métodos teóricos que se aproximam da excitação em si.

Como, por exemplo, o caminhar de pessoas sobre uma ponte ou passarela, o qual produz vibrações verticais e horizontais (longitudinais e transversais). Para a determinação destas ações, pode-se proceder com a utilização da modelagem matemática com conceitos estocásticos, onde são levados em consideração a massa da pessoa, o número de pessoas, comprimento da passada, etc...

Para a determinação da ação do vento sobre uma estrutura se pode proceder de duas maneiras teóricas distintas. A primeira e mais simples considera carregamentos estáticos equivalentes, conforme a NBR 6123 (1988) Forças devidas ao vento em edificações. Como segunda opção é considerar o vento como um processo aleatório, o qual utiliza do espectro de potência teórico proposto por Davenport.

A ação devida a equipamentos em estruturas e bases, da mesma forma como o caminhar de pessoas produz vibrações verticais e horizontais (longitudinais e transversais). A ação proveniente de equipamentos é devida ao desbalanceamento do rotor. Para a determinação destas ações, pode-se proceder com a utilização de modelagem matemática, onde são levados em consideração a massa do rotor do equipamento, como frequência circular e excentricidade do rotor, conforme Eurocode 1.

A ação devida a tremores de terra pode ser considerada, utilizando-se de acelerogramas de sismos reais ocorridos nas proximidades da implantação da estrutura, o que pode ser difícil de ser conseguido, pois várias localidades não possuem registros de sismos. Desta forma

procede-se com a utilização de processos aleatórios, um exemplo é o proposto por Kanai e Tajimi.

### 3.1.1 Sismo

Sismo, também chamado de abalo sísmico, terremoto ou tremor de terra, é o nome dado à liberação de energia na crosta do planeta terra, o qual geralmente ocorre devido ao choque de placas tectônicas, criando as ondas sísmicas. A atividade sísmica é referente à frequência, tipo e tamanho dos terremotos registrados de uma área em um período de tempo. Os sismos são registrados através de sismógrafos, onde a forma de medição é através de uma escala de magnitude de momento (MMS) que mede a magnitude dos terremotos em termos de energia liberada. Os registros de sismos com magnitude menor que 5 ocorrem com maior frequência, e são verificados por observatórios utilizando a escala local, mais conhecida como escala de Richter. A escala de magnitude de momento e a escala Richter possuem semelhanças numéricas. A escala de magnitude de momento introduzida por Thomas C. Haks e Hiroo Kanamori veio a substituir a escala Richter desenvolvida por Charles Francis Richter. Os sismos com intensidade menor que 3 na escala local são quase imperceptíveis, enquanto os maiores que 7 podem ocasionar diversos danos às estruturas, dependendo de sua profundidade. Para escalas maiores é utilizada a escala de Mercalli desenvolvida por Giuseppe Mercalli. Quanto mais raso for o sismo, ou seja, mais superficial à crosta terrestre, maior será a sua magnitude e maiores serão os danos causados.

A cada ano são estimados 500 mil terremotos detectados através da instrumentação existente, onde cerca de 20% destes podem ser sentidos (Pressler, 2010). A maioria dos terremotos ocorre frequentemente em locais como Califórnia e Alasca nos Estados Unidos, como em países como El Salvador, México, Guatemala, Chile, Peru, Indonésia, Irã, Paquistão, Açores em Portugal, Turquia, Nova Zelândia, Grécia, Itália, Índia e Japão, de acordo com *Earthquake Hazards Program*.

### 3.1.2 Placas Tectônicas

As placas tectônicas atingem toda a camada exterior da terra, conhecida como litosfera. As placas são enormes blocos rochosos semirrígidos, os quais fazem parte da camada sólida

externa do planeta. O mundo está dividido em 52 placas tectônicas, sendo 14 placas principais e 38 menores, as quais se movimentam sobre a crosta da terra de forma lenta e contínua, podendo se aproximar ou afastar.

As placas tectônicas são classificadas em três tipos:

- Oceânicas: encontram-se no assoalho oceânico;
- Continentais: Situam-se sob os continentes;
- Oceânicas e continentais: situam-se sob o continente e no assoalho oceânico.

Dentre as placas tectônicas, citam-se Placa: Norte Americana, Euro-Asiática, Africana, Sul-Americana, Australiana, do Pacífico, da Antártica, de Nazca Juan de Fuca, de Cocos, do Caribe, Arábica, Indiana, de Scotia, das Filipinas, etc.

A movimentação das placas ocorre em virtude das altas temperaturas no interior da terra. O intenso calor proveniente do magma provoca a movimentação circular do manto em correntes de convecção. Estas correntes de convecção transferem calor da camada mais interna da terra para as camadas externas, o que gera a movimentação das placas. As fronteiras ou margens são os limites das placas e correspondem as zonas de encontro entre elas, nas quais ocorre a movimentação e geram atividades sísmicas e vulcanismo. Os limites das placas tectônicas são classificados em divergentes, convergentes e transformante.

- Divergente: As placas se afastam e conseqüentemente formam fendas, onde através do movimento do magma este é levado à superfície resfriando-se, fazendo com que se acumulem nas bordas e aumentando o tamanho das fendas, podendo ocasionar vulcões e terremotos.
- Convergente: As placas se aproximam e se chocam. Quando o movimento convergente ocorre entre uma placa oceânica e uma continental, a oceânica retorna ao manto, enquanto a continental enrugam-se. No entanto, quando o movimento ocorre entre duas placas oceânicas, apenas uma das placas afundará. E quando o movimento ocorre entre duas placas continentais, não há afundamento das placas, e as duas sofrem dobramento.
- Transformante: As placas deslizam entre si, provocando rachaduras na região de contato entre as placas. Não ocorre destruição ou criação de placas, mas podem gerar falhas, como por exemplo a falha de San Andres.

O Brasil está localizado no centro da placa Sul-Americana, e por este motivo quase não sofre abalos sísmicos, a não ser os de pequena magnitude em virtude do desgaste. A placa Sul-Americana possui uma área de 43,6 milhões de quilômetros quadrados e aproximadamente 200 quilômetros de espessura.

### **3.1.3 PGA, amortecimento e frequência do solo**

O impacto dos tremores de terra em uma estrutura é determinado com a utilização das características do solo, tais como PGA - *Peak Ground Acceleration*, amortecimento e frequência do solo.

O PGA é igual a aceleração máxima do solo que ocorreu durante o tremor de um terremoto registrado em um local, ou seja, refere-se a maior amplitude da aceleração absoluta registrada de um terremoto específico em um local através do acelerograma.

Através do Programa de Avaliação de perigo Sísmico Global (*GSHAP – The Global Seismic Hazard Assessment Program*) é possível identificar as áreas de maior prevalência de ocorrência de terremotos de acordo com o *PGA*. O programa conta com um banco de dados e informações referente as zonas de sismicidade ao redor do mundo, nos quais são dispostos mapas com a identificação de *PGA* de acordo com a região.

A razão de amortecimento considera a razão entre a frequência de decaimento exponencial da envoltória e a frequência natural.

O amortecimento, assim como a frequência do solo é definido de acordo com cada região, ou seja, de acordo com as características de cada solo. Um solo arenoso terá uma frequência natural e um amortecimento diferentes de um solo rochoso, assim como se aplicam em materiais distintos, Brito, 2014.

### **3.1.4 Sismos adotados**

Para a verificação da resposta dinâmica de uma estrutura tem-se duas formas de obtenção dos sinais sísmicos. A primeira delas é a geração de sismos através de métodos de simulação onde são adotadas as características do solo, como razão de amortecimento, frequência e *PGA* da região onde se deseja instalar a estrutura. A segunda opção é através da obtenção dos sinais sísmicos reais, na qual busca-se por acelerogramas registrados nas regiões



de instalação da estrutura. Um dos sites que fornecem sinais sísmicos reais por região é o Portal de dados de movimento de solo em todo o mundo - *Cosmos Virtual Data Center*. Além de registros de sismos por região, o site ainda permite a localização de estações por região, bem como, a procura de dados de algum registro sísmico de um registro em específico. Dentre as regiões, dá-se ênfase a duas placas tectônicas: Califórnia e Japão, pelo fato de serem áreas de grande ocorrência de sismos. Citam-se os registros dos sismos El Centro e Loma Prieta ocorridos na placa tectônica Califórnia, assim como o sismo Kumamoto Shi ocorrido no Japão.

#### **3.1.4.1 Sismo El Centro**

O registro de aceleração do solo denominado El Centro é referente ao evento sísmico ocorrido em 1940, sob o *Imperial Valley*, no sudeste da Califórnia. Este terremoto ocorreu às 21:35 horário padrão do Pacífico em 18 de maio, no Imperial Valley, próximo à fronteira entre Estados Unidos e México, e teve a duração de aproximadamente 54 segundos. A magnitude deste sismo foi de 6,9 e uma intensidade máxima percebida de X (Extrema) na escala de intensidade de Mercalli. Sendo o primeiro e mais forte terremoto gravado no Imperial Valley por um grande sismógrafo localizado próximo a uma ruptura da falha [Hough, 2004]. Sendo caracterizado como um evento destrutivo de tamanho moderado típico, causando danos generalizados aos sistemas de irrigação, a morte de 9 pessoas, e 80% dos edifícios foram danificados em algum grau. Na área de negócios da Brawley, 50% das estruturas foram condenadas e todas foram atingidas. Foi o primeiro teste de resistência às escolas públicas após o terremoto *Long Beach* ocorrido em 1933.

#### **3.1.4.2 Sismo Loma Prieta**

O registro de aceleração do solo denominado Loma Prieta ocorreu em 17 de outubro de 1989 às 17:04 hora local (00:04 UTC do dia 18), na região da baía de São Francisco, Califórnia Estados Unidos.

O evento Loma Prieta foi registrado com magnitude 6.9 na escala de magnitude de momento. O terremoto ficou conhecido como o primeiro ocorrido da era moderna nos Estados Unidos, sendo transmitido ao vivo em rede nacional.

O epicentro localizado em uma falha de Santo André na montanha de Loma Prieta distante 16km ao nordeste de Santa Cruz teve a duração de 8 a 15 segundos com uma profundidade de 19km.

Ocasionou 63 mortes, deixando 3757 pessoas feridas e um prejuízo entre US\$ 5,6 a 6,0 bilhões.

### **3.1.4.3 Kumamoto Shi Japan**

O registro de aceleração do solo denominado Kumamoto Shi Japan refere-se ao evento sísmico ocorrido em 2016. Este terremoto ocorreu às 09:26 abaixo da cidade de Kumamoto da Prefeitura de Kumamoto na região de Kyushu, Japão, tendo a duração de aproximadamente 300 segundos.

O evento Kumamoto Shi Japan foi registrado com magnitude 6.2, sendo um de vários ocorridos no mesmo dia na região.

Danos graves ocorreram nas províncias de Kumamoto e Ōita, com várias estruturas desmoronando e pegando fogo. Mais de 44.000 pessoas foram evacuadas de suas casas devido ao desastre.

## **3.2 Otimização**

Otimização é o termo usado frequentemente para minimizar ou maximizar uma função. Em geral utiliza-se o termo de minimização, pois maximização de  $F(x)$  é alcançada através da minimização de  $-F(x)$ .

Otimização é um grande tópico e existem vários livros dedicados a ele, no entanto não há muitas aplicações práticas de projetos específicos de otimização robusta apresentados em bibliografias. Por ser uma área de estudo relativamente nova, está sujeita a desenvolvimentos constantes, em seus métodos e objetivos.

Em virtude do desenvolvimento constante e relativamente pela busca por eficiência e competitividade na redução de custo e peso em projetos estruturais, estão sendo cada vez mais aplicados métodos de otimização em busca do melhor projeto, nos quais pode-se citar aplicações nas áreas aeroespacial, projetos de equipamentos, automotiva, entre outras áreas da engenharia.

Alguns métodos básicos de otimização são bons o suficiente para problemas que são razoavelmente bem suportados e não envolvem muitas variáveis de projeto. Todos os algoritmos de otimização não são eficazes para um grau qualquer. Um deles pode trabalhar em um problema e em outro não. Usualmente ganha-se eficiência computacional, mas não necessariamente a confiabilidade.

Os algoritmos são classificados em algoritmos determinísticos, que utilizam a informação do gradiente, ou seja, usam os valores das funções e suas derivadas, e os metaheurísticos, algoritmos de otimização aleatórios que são métodos probabilísticos não baseados em gradiente, ou seja, usam somente a avaliação da função objetivo.

Os algoritmos de minimização são procedimentos iterativos que necessitam de valores iniciais da variável  $x$ . Se  $F(x)$  tem vários mínimos locais, a escolha inicial de  $x$  determina qual delas será calculado.

Conforme Jaan, 2005, os projetos são submetidos às restrições ou limitações, que podem ter a forma de igualdades ou desigualdades.

No entanto, a maioria dos projetos de otimização são feitos sem restrições, onde nenhuma limitação é adotada nas variáveis de projeto. Os problemas mais complexos de otimização, possuem limitações das quais os mínimos localizam-se onde  $F(x)$  cumprem estas premissas.

Conforme Borges, 2013, as vantagens dos algoritmos probabilísticos em relação aos determinísticos são:

- A função objetivo e as restrições não precisam, necessariamente, ter uma representação matemática;
- Não requerem que a função objetivo seja contínua ou diferenciável;
- Trabalham adequadamente, tanto com parâmetros contínuos quanto com discretos, ou ainda com uma combinação deles;
- Não necessitam de formulações complexas ou reformulações para o problema;
- Não há restrição alguma quanto ao ponto de partida dentro do espaço de busca da solução;
- Realizam buscas simultâneas no espaço de possíveis soluções através de uma população de indivíduos, sendo, portanto, candidatos à utilização de paralelização em computadores;

- Otimizam um grande número de variáveis, desde que a avaliação da função objetivo não tenha um custo computacional demasiadamente alto.

A maior desvantagem dos métodos probabilísticos em relação aos métodos determinísticos é o custo computacional.

Em problemas de otimização tem-se conceitos básicos como: variáveis de projeto, função objetivo e restrições.

- As variáveis de projeto são os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. Estas podem ser classificadas em discretas e contínuas. De acordo com Borges, 2013, as variáveis contínuas podem assumir qualquer valor real, enquanto que as variáveis discretas são limitadas a valores predefinidos.

- A função objetivo quantifica o que se está otimizando e será uma medida da eficiência do projeto.

- As restrições são os limites impostos ao problema de otimização, e estas podem ser classificadas em limites laterais, em uma desigualdade de um determinado valor, ou ainda um valor de igualdade para um valor predefinido.

A formulação de um algoritmo de otimização é dada por:

<i>Minimizar</i> $f(x)$	
$x$	
<i>tal que</i>	$h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n_e$
	$g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n_g$

Fonte: Próprio Autor, 2022

onde  $f(x)$  é a função objetivo,  $x$  é a variável de projeto,  $h_k(x) = 0$  e  $g_j(x) \geq 0$  se referem às restrições.

Como exemplos de algoritmos metaheurísticos clássicos podem-se citar: *Genetic Algorithms*, *Particle Swarm Optimization*, *Harmony Search* e *Ant Colony Optimization*. Destacam-se como algoritmos metaheurísticos desenvolvidos e bastante difundidos mais recentes: *Big Bang-Big Crunch Algorithm*, *Ray Optimization*, *Imperialist Competitive Algorithm*, *Mine Blast Algorithm*, *Firefly Algorithm*, *Bat-Inspired Algorithm*, *Cukoo Search*

*Algorithm, Dolphin Echolocation, Teaching-Learning-Based Optimization, Chaotic Swarming of particles, Colliding Bodies Optimization*, entre outros.

### **3.3 Distribuição LogNormal**

Como explicado anteriormente, os parâmetros da estrutura, como massa, rigidez e amortecimento, os parâmetros MTMD, como constantes de mola e amortecimento e também os parâmetros de carga sísmica, como PGA, frequência do solo e amortecimento do solo, são modelados como variáveis aleatórias com distribuição Lognormal, com coeficientes de variação e valores médios conhecidos.

### **3.4 Latin Hypercube Sampling (LHS)**

Para a determinação da otimização robusta de múltiplos amortecedores instalados em estruturas submetidas a excitação sísmica, é proposto uma metodologia que utiliza as incertezas presentes tanto na estrutura quanto na excitação, através da modelagem de muitos parâmetros como variáveis aleatórias. E para a redução do custo computacional utiliza-se o *Latin Hypercube Sampling* (LHS), que fornece uma maneira eficiente de gerar variáveis a partir de suas distribuições multivariadas, retirando amostras de intervalos igualmente prováveis. O esquema desenvolvido por McKay, 1979, seleciona diferentes valores de uma variável aleatória como segue: O domínio da variável aleatória é dividido em  $n$  intervalos não sobrepostos de probabilidade igual. Um valor de cada intervalo é escolhido aleatoriamente em relação à densidade de probabilidade no intervalo. A escolha deve ser feita de maneira aleatória em relação a densidade em cada intervalo; isto é, a seleção deve refletir a altura da densidade ao longo do intervalo. Para mais informações sobre o LHS, é recomendado ler os artigos McKay et al., 1979 e Wyss et al., 1998.

## 4 METODOLOGIA PROPOSTA

### 4.1 Resposta Dinâmica da Estrutura

A resposta dinâmica de uma estrutura com vários graus de liberdade, submetida a uma aceleração na base, é dada pelo sistema de equações diferenciais do movimento dinâmico, através da equação:

$$[M]\ddot{\vec{x}}(t) + [C]\dot{\vec{x}}(t) + [K]\vec{x}(t) = -[M]\ddot{\vec{x}}_g(t) \quad (4.1)$$

onde:

[M] é a matriz de massa do sistema

[C] é a matriz de amortecimento do sistema

[K] é a matriz de rigidez do sistema

t é o tempo

$\ddot{\vec{x}}(t)$  é o vetor de aceleração do sistema, em função do tempo

$\dot{\vec{x}}(t)$  é o vetor de velocidade do sistema, em função do tempo

$\vec{x}(t)$  é o vetor de deslocamento do sistema, em função do tempo

$\ddot{\vec{x}}_g(t)$  é a aceleração do solo

### 4.2 Método de Newmark

Os métodos de integração numérica direta são classificados em implícitos e explícitos. Estes métodos consistem em procedimentos numéricos que não requerem o cálculo prévio dos autovalores e autovetores da estrutura. As funções que representam a variação de velocidade e deslocamento dentro do intervalo de tempo  $\Delta t$  são obtidas através da integração da função que representa a variação da aceleração dentro do mesmo intervalo de tempo  $\Delta t$ . A convergência e a exatidão da solução, dependem da capacidade da função adotada para representar a aceleração com precisão dentro de cada intervalo de tempo  $\Delta t$ , e também do tamanho do intervalo.

Segundo Groehs (2001), o método de Newmark é o mais eficaz dos métodos implícitos, que utilizam a equação do movimento no instante  $t+\Delta t$  para calcular a resposta neste mesmo instante. As equações que representam a variação de deslocamento, da velocidade e aceleração no instante  $t+\Delta t$ , são dadas pelas equações 4.2, 4.3 e 4.4 respectivamente:

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0[M] + a_5[C] + [K])^{-1} \quad (4.2)$$

$$\{F(t_{i+1}) + [M][a_0\vec{x}(t_i) + a_1\dot{\vec{x}}(t_i) + a_2\ddot{\vec{x}}(t_i)] + [C][a_5\vec{x}(t_i) + a_6\dot{\vec{x}}(t_i) + a_7\ddot{\vec{x}}(t_i)]\}$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6\dot{\vec{x}}(t_i) - a_7\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.3)$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1\dot{\vec{x}}(t_i) - a_2\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.4)$$

onde os vetores  $\vec{x}(t_{i+1})$ ,  $\dot{\vec{x}}(t_{i+1})$ ,  $\ddot{\vec{x}}(t_{i+1})$  representam o deslocamento, a velocidade e a aceleração no tempo  $t+\Delta t$ , e os vetores  $\vec{x}(t_i)$ ,  $\dot{\vec{x}}(t_i)$ ,  $\ddot{\vec{x}}(t_i)$  representam o deslocamento, a velocidade e a aceleração no tempo  $t$ , respectivamente.

As constantes  $a$  são parâmetros do método de Newmark dados pelo conjunto de equações 4.5:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\alpha N \Delta t^2}, \quad a_1 = \frac{1}{\alpha N \Delta t}, \quad a_2 = \frac{1}{2\alpha N} - 1, \quad a_3 = (1 - \delta N) \Delta t \\ a_4 &= \delta N \Delta t, \quad a_5 = \frac{\delta N}{\alpha N \Delta t}, \quad a_6 = \frac{\delta N}{\alpha} - 1, \quad a_7 = \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta N}{\alpha} - 2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Os parâmetros  $\alpha N$  e  $\delta N$  são incondicionalmente estáveis para valores de  $\alpha N = 0,5$  e  $\delta N = 0,25$ . Para o primeiro passo de tempo, os vetores deslocamento e velocidade devem ter condições de contorno conhecidas. O vetor aceleração inicial é dado pela equação 4.6:

$$\ddot{\vec{x}}(t_0) = [M]^{-1} [\vec{F}(t_0) - [C]\dot{\vec{x}}(t_0) - [K]\vec{x}(t_0)] \quad (4.6)$$

### 4.3 Parâmetros Aleatórios do Edifício

Os parâmetros dos edifícios normalmente apresentam uma certa incerteza em seus valores, sendo melhores modelados através de um valor médio e de um coeficiente de variação. Desta forma, adota-se uma abordagem probabilística paramétrica para modelar as incertezas. A metodologia é semelhante à utilizada por Miguel et al., 2016, para amortecedores por atrito.

A massa, a rigidez e o amortecimento do edifício são assumidos como variáveis aleatórias. Em função da não possibilidade de estas variáveis aleatórias assumirem valores negativos, devido a aspectos físicos, essas três variáveis estocásticas são modeladas como variáveis aleatórias não correlacionadas com distribuição Lognormal, com média e coeficiente de variação conhecidos. Em consequência, em cada execução da sub-rotina desenvolvida, a estrutura apresenta diferentes parâmetros. Como a resposta do edifício depende dessas variáveis aleatórias, também se torna aleatória.

#### 4.4 Dimensionamento de Múltiplos TMDs

Múltiplos TMDs são dispostos na estrutura conforme a necessidade, como previamente já mencionado. De acordo com Miguel et al., 2016, a distribuição dos MTMD é disposta na estrutura de forma vertical e horizontal, como apresentado na Figura 1.

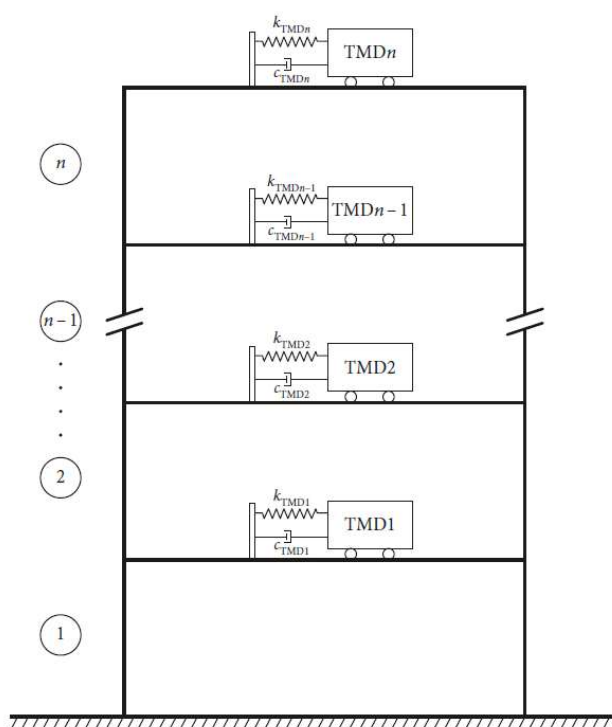


Figura 1 - Edifício de  $n$ -graus de liberdade com NTMD amortecedores de massa sintonizados horizontalmente e verticalmente distribuídos ao longo do edifício – Fonte: Vellar et al., 2019.



A determinação das posições e dos parâmetros ótimos, como rigidez e amortecimento, para instalação dos MTMD é feita através da utilização de algoritmos metaheurísticos de otimização, os quais são capazes de lidar como problemas complexos, que envolvem variáveis de projeto mistas (contínuas e discretas no mesmo problema), como no problema proposto nesta tese.

A contribuição da matriz Kd do TMD é ilustrada na equação 4.7. O procedimento é análogo ao da matriz de amortecimento Cd. Por outro lado, a matriz de massa Md diagonal é dada por  $\text{diag} [M \text{ Md}]$ , e cada massa do TMD ocupa uma posição na diagonal principal.

$$\begin{bmatrix}
 k_1 + k_2 + \sum_{i=1}^{N_{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_{AMS}^{2ndFloor}} k_{d2i} & \dots & \vdots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -k_{d21} & -k_{d22} & \dots & -k_{d2n} & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & \dots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & k_n + \sum_{i=1}^{N_{AMS}^{NthFloor}} 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 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \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 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \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 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \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 & k_{dn2} & \dots & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & -k_{dnn} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & k_{dnn}
 \end{bmatrix}
 \quad (4.7)$$

Simplificando a montagem das matrizes de rigidez e amortecimento para o caso de ter-se a possibilidade de um único TMD no topo, a contribuição dos amortecedores para K é ilustrada na equação 4.8. Conforme descrito acima, o procedimento para a matriz de amortecimento é análogo. Assim como a matriz de massa é diagonal  $[M] = \text{diag} [M \text{ MTMD}]$ , e cada massa do amortecedor (MTMD) ocupa uma posição na diagonal principal.

$$[K] = \begin{bmatrix}
 k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 & 0 \\
 -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & k_n + k_{TMD} & -k_{TMD} \\
 0 & 0 & \dots & -k_{TMD} & k_{TMD}
 \end{bmatrix}
 \quad (4.8)$$

De forma semelhante as contribuições dos amortecedores para a configuração da montagem da matriz de rigidez para os casos de distribuição dos amortecedores na horizontal (mais de um TMD distribuído em um único andar), bem como, distribuição dos amortecedores na vertical (de um único TMD por andar de forma distribuída entre os andares) são apresentadas

nas equações 4.9 e 4.10, respectivamente. De forma análoga, obtém-se a matriz de amortecimento.

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_{TMD1} & -k_2 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 + k_{TMD2} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_n + k_{TMDn} & -k_{TMD1} & -k_{TMD2} & \dots & -k_{TMDn} \\ 0 & 0 & \dots & -k_{TMD1} & k_{TMD1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -k_{TMD2} & 0 & k_{TMD2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -k_{TMDn} & 0 & 0 & \dots & k_{TMDn} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_{TMD1} & -k_2 & \dots & 0 & -k_{TMD1} & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 + k_{TMD2} & \dots & 0 & 0 & -k_{TMD2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & k_n + k_{TMDn} & 0 & 0 & \dots & -k_{TMDn} \\ -k_{TMD1} & 0 & \dots & 0 & k_{TMD1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -k_{TMD2} & \dots & 0 & 0 & k_{TMD2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -k_{TMDn} & 0 & 0 & \dots & k_{TMDn} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Para considerar incertezas nos MTMD instalados, seus parâmetros de rigidez e amortecimento também são assumidos como variáveis aleatórias Lognormal independentes com coeficientes de variação conhecidos e valores médios dados pelas variáveis de projeto.

#### 4.5 Geração do Sinal de Excitação

Para cada tipo de ação na qual se deseja simular, há um método específico a ser adotado. O espectro de Kanai-Tajimi é muito utilizado para a simulação de sismos. Portanto, a geração do sinal sísmico aleatório foi desenvolvida pelo método de Kanai-Tajimi. Usa-se como parâmetros de entrada, o tempo inicial  $t=0$  segundos, tempo final em segundos, e um incremento de tempo em segundos, sendo tempo final e intervalo de tempo definidos ao se gerar o sinal. Segundo Rodrigues, 2012, o tempo de duração de um sismo é de grande importância, mas difícil de ser estimado. Adota-se um vetor de frequências, com frequência mínima de 0 Hz, frequência máxima e um incremento de frequência em Hz, da mesma forma definidos ao gerar o sinal.

A densidade espectral de potência pode ser calculada através da equação:

$$S(w) = S_0 \left[ \frac{w_g^4 + 4w_g^2 \zeta_g^2 w^2}{(w^2 - w_g^2)^2 + 4w_g^2 \zeta_g^2 w^2} \right] \quad (4.11)$$

$$S_0 = \frac{0,03 \zeta_g}{\pi w_g (4 \zeta_g^2 + 1)} \quad (4.12)$$

onde  $S_0$  é a densidade espectral constante,  $\zeta_g$  é o amortecimento natural do solo, e  $w_g$  é a frequência natural do solo.

Conforme Shinozuka e Jan, 1972, pode-se usar a equação 4.13 para encontrar a aceleração do solo no domínio do tempo.

$$\vec{x}_g(t) = \sum_{k=1}^n \sqrt{2S(w_k) \Delta w} \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (4.13)$$

onde  $\phi_k$  é o ângulo de fase aleatório, o qual varia de 0 a  $2\pi$  com distribuição uniforme, e a banda de frequências é dividida em  $n$  intervalos.

O sinal sísmico de aceleração do solo gerado deve ser normalizado pelo pico de aceleração do solo (PGA – *peak ground acceleration*) desejado.

No entanto, a solução ótima possivelmente será diferente se os parâmetros do solo do espectro de Kanai-Tajimi forem alterados. Portanto, as incertezas na excitação do solo devem ser consideradas, e para levar em conta a natureza aleatória da excitação dinâmica, a frequência do solo  $w_g$ , o amortecimento do solo  $\zeta_g$ , e o PGA são assumidos como variáveis independentes Lognormais com média e coeficientes de variação conhecidos. Consequentemente, em cada execução da sub-rotina desenvolvida, um histórico de tempo diferente do terremoto é gerado.

#### 4.6 Algoritmo e Problema de Otimização Robusta

A função objetivo usada para avaliar a efetividade dos MTMD instalados em edifícios sob excitação sísmica é o valor esperado do máximo *Drift*  $E[D_{\max}]$ , e é obtido pela solução da equação do movimento no domínio do tempo através do vetor  $\vec{x}(t)$ .

As variáveis de projeto são as posições e os parâmetros dos MTMD, ou seja, as constantes de rigidez e amortecimento, consideradas como variáveis de projeto contínuo, e as posições na estrutura, consideradas como variáveis de projeto discretas.

Portanto, dadas as possíveis posições (npTMD) no vetor  $\vec{P}$  para o número máximo de dispositivos (nTMD) a serem instalados na estrutura, é interessante determinar a posição ótima

e os parâmetros ótimos (constantes de rigidez e amortecimento) de cada TMD para minimizar o valor esperado do máximo *Drift*. As variáveis de projeto são agrupadas no vetor  $\vec{y} = [\vec{P}, E[k_{TMD}], E[c_{TMD}]]$ . Assim, o problema de otimização pode ser colocado como:

$$\begin{array}{l}
 \text{Encontre} \quad \vec{y} \\
 \text{Minimiza} \quad J(\vec{y}) = E[D_{max}(\vec{y})] \\
 \text{Sujeito a} \quad \left\{ \begin{array}{l}
 k_{TMD}^{min} \leq E[k_{TMD}] \leq k_{TMD}^{max} \\
 c_{TMD}^{min} \leq E[c_{TMD}] \leq c_{TMD}^{max} \\
 \text{número de posições possíveis} = npTMD \\
 \text{número máximo de amortecedores} = nTMD
 \end{array} \right. \quad (4.14)
 \end{array}$$

Como explicado anteriormente, o problema de otimização apresentado é complexo, envolvendo incertezas, variáveis mistas e função objetivo não convexa. Portanto, esse tipo de problema de otimização deve ser resolvido por métodos capazes de lidar com esses problemas. Dentro dos métodos de otimização, as técnicas heurísticas são mais adequadas para resolver esses problemas de otimização. Neste contexto, pelo fato de os problemas reais serem complexos devido à natureza multidimensional e multimodal, o desenvolvimento de novas ferramentas vem avançando e os algoritmos metaheurísticos BOA (*Butterfly Optimization Algorithm*), GWO (*Grey Wolf Optimizer*) e WOA (*The Whale Optimization Algorithm*) são algumas das mais recentes ferramentas desenvolvidas para resolver este tipo de problema.

#### 4.6.1 *Butterfly Optimization Algorithm (BOA)*

BOA é um algoritmo metaheurístico inspirado na natureza (Algoritmo de Otimização de Borboleta) que imita a pesquisa de alimentos e o comportamento de acasalamento das borboletas, para resolver problemas globais de otimização. Conforme Arora et al., BOA é baseada na estratégia de forrageamento das borboletas, as quais utilizam seu olfato para determinar a localização do néctar ou do parceiro de acasalamento. O comportamento das borboletas pode ser descrito como seu movimento cooperativo em direção à posição da fonte de alimento. As borboletas recebem / sentem e analisam o cheiro no ar para determinar a direção potencial de uma fonte de alimento e ou parceiro de acasalamento. O BOA imita esse comportamento para encontrar os ótimos no espaço de hiper busca.

O fenômeno natural das borboletas é baseado em duas questões importantes: a variação de  $I$  (intensidade do estímulo) e a formulação de  $f$  (fragrância).

Por uma questão de simplicidade,  $I$  de uma borboleta está associado à função objetivo codificada. No entanto,  $f$  é relativo, isto é, deve ser detectado por outras borboletas. De acordo com a lei de energia de Steven (Stevens, 1975), a fim de diferenciar o cheiro de outras modalidades,  $c$  (modalidade sensorial) é usado. Conforme a borboleta com menos  $I$  se move em direção à borboleta com mais  $I$ ,  $f$  aumenta mais rapidamente que  $I$ . Portanto, deve-se permitir que  $f$  varie com um grau de absorção que é alcançado pelo parâmetro  $a$  (expoente de potência). Usando esses conceitos, no BOA, a fragrância é formulada em função da intensidade física do estímulo, como segue:

$$f = c I^a \quad (4.15)$$

onde  $f$  é a magnitude percebida da fragrância, ou seja, quão mais forte a fragrância é percebida por outras borboletas,  $c$  é a modalidade sensorial,  $I$  é a intensidade do estímulo e  $a$  é o expoente de potência dependente da modalidade, que explica o grau variável de absorção. Na maioria dos casos em nossa implementação, pode-se escolher  $a$  e  $c$  no intervalo  $[0, 1]$ . O parâmetro  $a$  é o expoente de potência dependente da modalidade (fragrância no nosso caso), o que significa que caracteriza a variação da absorção. Num extremo,  $a = 1$ , isto significa que não há absorção de fragrância, isto é, a quantidade de fragrância emitida por uma borboleta em particular é sentida na mesma capacidade pelas outras borboletas. Isso equivale a dizer que a fragrância é propagada em um ambiente idealizado. Assim, uma fragrância emissora de borboleta pode ser detectada em qualquer lugar do domínio. Assim, um único ótimo (geralmente global) pode ser alcançado facilmente. Por outro lado, se  $a = 0$ , significa que a fragrância emitida por qualquer borboleta não pode ser detectada pelas outras borboletas. Portanto, o parâmetro  $a$  controla o comportamento do algoritmo. Outro parâmetro importante é  $c$ , que também é um parâmetro crucial para determinar a velocidade da convergência e como o algoritmo BOA se comporta. Teoricamente  $c \in [0, \infty]$ , mas praticamente é determinado pela característica do sistema a ser otimizado. Os valores de  $a$  e  $c$  afetam crucialmente a velocidade de convergência do algoritmo.

As características das borboletas são idealizadas com os seguintes passos:

1. Todas as borboletas devem emitir alguma fragrância que permita que as borboletas se atraiam.

2. Cada borboleta se move aleatoriamente ou em direção à melhor borboleta que emite mais fragrância.

3. A intensidade do estímulo de uma borboleta é afetada ou determinada pela paisagem da função objetivo.

Existem três fases no BOA: (1) fase de inicialização, (2) fase de iteração e (3) fase final. Em cada execução do BOA, primeiro a fase de inicialização é executada, a pesquisa é realizada de maneira iterativa e, na última fase, o algoritmo é finalizado finalmente quando a melhor solução é encontrada. Na fase de inicialização, o algoritmo define a função objetivo e seu espaço de solução. Os valores para os parâmetros usados no BOA também são atribuídos. Após definir os valores, o algoritmo cria uma população inicial de borboletas para otimização. Como o número total de borboletas permanece inalterado durante a simulação do BOA, uma memória de tamanho fixo é alocada para armazenar suas informações. As posições das borboletas são geradas aleatoriamente no espaço de pesquisa, com seus valores de fragrância e aptidão calculados e armazenados. Isso termina a fase de inicialização e o algoritmo inicia a fase de iteração, que realiza a pesquisa com as borboletas artificiais criadas.

A segunda fase do algoritmo, isto é, fase de iteração, várias iterações são executadas pelo algoritmo. Em cada iteração, todas as borboletas no espaço da solução passam para novas posições e, em seguida, seus valores de adequação são avaliados. O algoritmo calcula primeiro os valores de aptidão de todas as borboletas em diferentes posições no espaço da solução. Então essas borboletas irão gerar fragrância em suas posições usando a Equação 4.15.

Existem duas etapas principais no algoritmo, ou seja, fase de pesquisa global e fase de pesquisa local. Na fase de pesquisa global, a borboleta dá um passo em direção à borboleta / solução mais adequada, a qual pode ser representada usando a Equação 4.16.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 \cdot g^* - x_i^t) \cdot f_i \quad (4.16)$$

onde  $x_i^t$  é o vetor de solução  $x_i$  da  $i$ -ésima borboleta na iteração número  $t$ . Aqui,  $g^*$  representa a melhor solução atual encontrada entre todas as soluções na iteração atual. A fragrância da  $i$ -ésima borboleta é representada por  $f_i$  e  $r$  é um número aleatório em  $[0, 1]$ .

A fase de pesquisa local pode ser representada como

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 \cdot x_j^t - x_k^t) \cdot f_i \quad (4.17)$$

onde  $x_j^t$  e  $x_k^t$  são  $j$ th e  $k$ th borboletas do espaço de solução. Se  $x_j^t$  e  $x_k^t$  pertencem ao mesmo enxame e  $r$  é um número aleatório entre  $[0, 1]$ , então a Equação 4.17 torna-se um passeio aleatório local.

A busca de alimento e parceiro de acasalamento por borboletas pode ocorrer em escala local e global. Considerando a proximidade física e vários outros fatores, como chuva, vento, etc., a busca por comida pode ter uma fração significativa de  $p$  em um parceiro de acasalamento geral ou em atividades de busca de alimentos por borboletas. Portanto, uma probabilidade de troca  $p$  é usada no BOA para alternar entre pesquisa global comum e pesquisa local intensiva.

Até que o critério de parada não seja correspondido, a fase de iteração continua. Os critérios de parada podem ser definidos de diferentes maneiras, como o tempo máximo de CPU usado, o número máximo de iterações atingidas, o número máximo de iterações sem aprimoramento, um valor específico da taxa de erros é atingido ou qualquer outro critério apropriado. Quando a fase de iteração é concluída, o algoritmo gera a melhor solução encontrada com a melhor forma possível. As três etapas acima mencionadas compõem o algoritmo completo do algoritmo de otimização de borboleta e seu pseudo-código é explicado na Figura 2.

---

 Algoritmo de Otimização de Borboleta – BOA
 

---

```

1: Função Objetivo:  $f(x)$ ,  $x=(x_1, x_2, \dots, x_{dim})$ ,  $dim$ =número de dimensões
2: Gerar população inicial de n Borboletas  $x_{I=(i=1,2,\dots,n)}$ 
3: Intensidade de estímulo  $I_i$  em  $x_i$  é determinado por  $f(x_i)$ 
4: Defina a modalidade de sensor  $c$ , expoente de potência  $a$  e mude a probabilidade  $p$ 
5: while critérios não são atendidos do
6:   for each borboleta  $bf$  na população do
7:     Calcular fragrância para  $bf$  usando a equação 4.13
8:   end for
9:   Encontre o melhor  $bf$ 
10:  for each borboleta  $bf$  na população do
11:    Gerar um número aleatório  $r$  de  $[0, 1]$ 
12:    if  $r < p$  then
13:      avançar para a melhor solução / borboleta usando a equação 4.16
14:    else
15:      Mover aleatoriamente usando a equação 4.17
16:    end if
17:  end for
18:  Atualize o valor de  $a$ 
19: end while
20: Resultado da melhor solução encontrada
  
```

---

 Figura 2 - Pseudocódigo *Butterfly Optimization Algorithm* [Adaptada de Arora et al., 2018].

#### 4.6.2 Grey Wolf Optimizer (GWO)

GWO é um algoritmo metaheurístico inspirado na natureza, em lobos cinzentos. O algoritmo GWO imita a hierarquia de liderança e o mecanismo de caça dos lobos cinzentos na natureza. Quatro tipos de lobos cinzentos, como alfa, beta, delta e ômega, são empregados para simular a hierarquia de liderança. Na Figura 3, é demonstrado a hierarquia do lobo cinzento. Além da hierarquia, no algoritmo são implementadas as três principais etapas da caça: a procura, cercamento e o ataque das presas.



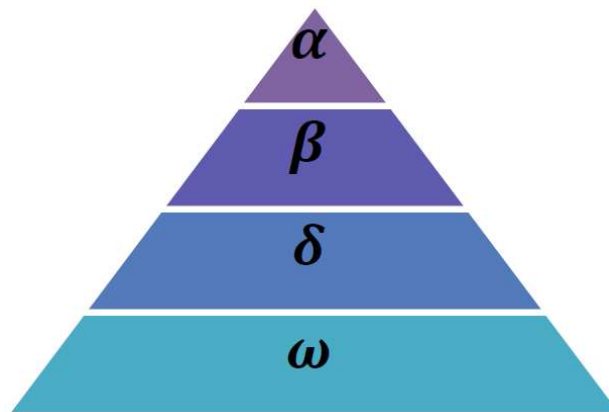


Figura 3 - Hierarquia do lobo cinzento (a dominância diminui de cima para baixo).

Os líderes são machos ou fêmeas, chamados alfas. O alfa é o principal responsável por tomar decisões sobre caça, local de dormir, hora de acordar e assim por diante. As decisões do alfa são ditadas para o restante da matilha.

O segundo nível na hierarquia dos lobos cinzentos é beta. Os betas são lobos subordinados que ajudam o alfa na tomada de decisões ou em outras atividades da matilha.

O lobo cinzento de classificação mais baixa é ômega. O ômega desempenha o papel de bode expiatório.

Se um lobo não é um alfa, beta ou ômega, ele é chamado de subordinado (ou delta em algumas referências).

Além da hierarquia social dos lobos, a caça em grupo é outro comportamento social interessante dos lobos cinzentos. As principais fases da caça ao lobo cinzento são as seguintes:

1. Rastrear, perseguir e abordar a presa
2. Perseguir, cercar e assediar a presa até que ela pare de se mover
3. Ataque contra a presa

No algoritmo GWO, essa técnica de caça e a hierarquia social dos lobos cinzentos são modeladas matematicamente para projetar o GWO e executar a otimização.

Os modelos matemáticos da hierarquia social, rastreamento, circundamento e ataque de presas é detalhado conforme o algoritmo nos passos a seguir:

### **Hierarquia Social:**

O algoritmo GWO considera a solução mais adequada como o alfa ( $\alpha$ ), e conseqüentemente, a segunda e a terceira melhores soluções são nomeadas beta ( $\beta$ ) e delta ( $\delta$ ),

respectivamente para a modelagem matemática de acordo com a hierarquia social dos lobos. O restante das soluções candidatas é assumido como ômega ( $\omega$ ). No algoritmo GWO, a caça (otimização) é guiada por  $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\delta$ . Os lobos  $\omega$  seguem esses três lobos.

### Presas Circundantes:

Os lobos cinzentos cercam presas durante a caçada, e para modelar matematicamente o comportamento envolvente, são propostas as seguintes equações:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(ta) - \vec{X}(ta)| \quad (4.18)$$

$$\vec{X}(ta + 1) = \vec{X}_p(ta) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4.19)$$

onde  $ta$  indica a iteração atual,  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$  são os vetores coeficiente,  $\vec{X}_p$  é o vetor de posição da presa, e  $\vec{X}$  indica o vetor de posição de um lobo cinza. Os vetores  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$  são calculados por:

$$\vec{A} = 2 \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (4.20)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4.21)$$

onde os componentes  $\vec{a}$  de são linearmente diminuídos de 2 para 0 ao longo das iterações e  $r_1$ ,  $r_2$  são vetores aleatórios entre  $[0,1]$ .

Um lobo cinza pode atualizar sua posição dentro do espaço ao redor da presa em qualquer local aleatório usando as equações (4.18) e (4.19). O mesmo conceito pode ser estendido para um espaço de pesquisa com  $n$  dimensões, e os lobos cinzentos se moverão em hipercubos ou hiperesferas em torno da melhor solução obtida até o momento.

### Caçando:

Lobos cinzentos têm a capacidade de reconhecer a localização das presas e cercá-las. A caça geralmente é guiada pelo alfa. O beta e o delta também podem participar da caça ocasionalmente. No entanto, em um espaço de pesquisa abstrata, não é possível ter ideia sobre a localização do ótimo (presa). Para simular matematicamente o comportamento de caça dos

lobos cinzentos, supõem-se que o alfa (melhor solução candidato) beta e o delta tenham melhor conhecimento sobre a possível localização da presa. Portanto, o algoritmo salva as três primeiras melhores soluções obtidas até o momento e obriga os outros agentes de pesquisa (incluindo os ômeegas) a atualizar suas posições de acordo com a posição do melhor agente de pesquisa. As equações a seguir são propostas nesse sentido.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|; \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|; \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (4.22)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (4.23)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (4.24)$$

#### **Atacar Presas (Exploração):**

Os lobos cinzentos terminam a caça atacando a presa quando ela para de se mover. Para modelar matematicamente a aproximação da presa, é feita a diminuição do valor de  $\vec{a}$ . Observe que o intervalo de flutuação de  $\vec{A}$  também é diminuído por  $\vec{a}$ . Em outras palavras  $\vec{A}$  é um valor aleatório no intervalo  $[-a, a]$  onde  $a$  é diminuído de 2 para 0 ao longo das iterações. Quando os valores aleatórios de  $\vec{A}$  estão entre  $[-1, 1]$ , a próxima posição de um agente de pesquisa pode estar em qualquer posição entre sua posição atual e a posição da presa.

Com os operadores propostos até agora, o algoritmo GWO permite que seus agentes de pesquisa atualizem sua posição com base na localização do alfa, beta e delta; e ataque em direção à presa. No entanto, o algoritmo GWO é propenso a estagnação em soluções locais com esses operadores. É verdade que o mecanismo envolvente proposto mostra exploração até certo ponto, mas o GWO precisa de mais operadores para enfatizar a exploração.

#### **Procure Presas (exploração):**

Os lobos cinzentos pesquisam principalmente de acordo com a posição do alfa, beta e delta. Eles divergem um do outro para procurar presas e convergem para atacar presas. Para modelar matematicamente a divergência, utiliza-se valores aleatórios maiores que 1 ou menores que -1 para obrigar o agente de busca a divergir da presa. Isso enfatiza a exploração e permite que o algoritmo GWO pesquise globalmente.

Outro componente do GWO que favorece exploração é  $\vec{C}$ . Como pode ser visto na Equação (4.20), o vetor contém valores aleatórios entre  $[0, 2]$ . Esse componente fornece pesos aleatórios para presas, a fim de enfatizar estatisticamente ( $C > 1$ ) ou enfatizar ( $C < 1$ ) com o efeito da presa na definição da distância na Equação (4.18). Isso ajuda o GWO a mostrar um comportamento mais aleatório durante a otimização, favorecendo a exploração e a prevenção de otimizações locais. Vale mencionar aqui que  $C$  não diminui linearmente em contraste com  $A$ . Deliberadamente exige-se que  $C$  forneça valores aleatórios o tempo todo, a fim de enfatizar a exploração não apenas durante as iterações iniciais, mas também nas iterações finais. Esse componente é muito útil em caso de estagnação ótima local, especialmente nas iterações finais.

O vetor  $C$  também pode ser considerado como o efeito de obstáculos à aproximação da presa na natureza. De um modo geral, os obstáculos da natureza aparecem nos caminhos de caça dos lobos e, de fato, impedem que eles se aproximem rápida e convenientemente das presas. É exatamente isso que o vetor  $C$  faz. Dependendo da posição de um lobo, ele pode aleatoriamente dar um peso à presa e dificultar e alcançar mais os lobos, ou vice-versa.

Em resumo, o processo de busca começa com a criação de uma população aleatória de lobos cinzentos (soluções candidatas) no algoritmo GWO. Ao longo das iterações, os lobos alfa, beta e delta estimam a posição provável da presa. Cada solução candidata atualiza sua distância da presa. O parâmetro  $a$  é diminuído de 2 para 0 para enfatizar o desenvolvimento e a exploração, respectivamente. As soluções candidatas tendem a divergir da presa quando  $|\vec{A}| > 1$  e convergem para a presa quando  $|\vec{A}| < 1$ . Finalmente, o algoritmo GWO é finalizado pela satisfação de um critério final. Na Figura 4 é apresentado o pseudo-código do GWO.

```

Inicialize a população de lobo cinza  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )
Inicialize  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
Calcular a adequação de cada agente de pesquisa
 $X_\alpha$  = o melhor agente de pesquisa
 $X_\beta$  = o segundo melhor agente de pesquisa
 $X_\delta$  = o terceiro melhor agente de pesquisa
while ( $t < \text{Máximo número de iterações}$ )
    for each agente de pesquisa
        Atualize a posição do agente de pesquisa atual pela equação (4.19)
    end for
    Atualize  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
    Calcular a adequação de todos os agentes de pesquisa
    Atualize  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ , and  $X_\delta$ 
     $t = t+1$ 
end while
retorna  $X_\alpha$ 

```

Figura 4 - Pseudocódigo *Grey Wolf Optimizer* [Adaptada de Mirjalili et al., 2014].

#### 4.6.3 *The Whale Optimization Algorithm (WOA)*

WOA é um algoritmo metaheurístico inspirado na natureza, que imita o comportamento social das baleias jubarte. O Algoritmo WOA é inspirado pela estratégia de caça à rede de bolhas. A principal diferença entre este algoritmo e os anteriores, é o comportamento de caça simulado, com aleatório, ou o melhor agente de busca para perseguir a presa e o uso de uma espiral para simular o ataque à rede de bolhas, mecanismo das baleias jubarte. Existem 7 espécies principais diferentes deste tipo de mamífero gigante. As baleias são consideradas predadoras, podem crescer até 30 metros de comprimento e 180 toneladas de peso e são consideradas animais altamente inteligentes e com emoção.

De acordo com Mirjalili (2016), as baleias possuem células fusiformes, semelhantes as células dos humanos. Essas células são responsáveis por julgamentos, emoções e comportamentos sociais. Outro ponto interessante é o fato do comportamento social das baleias, fazendo com que possam viver sozinhas ou em grupos. A baleia jubarte é uma das maiores

baleias de barbatanas (quase do tamanho de um ônibus escolar). O mais interessante sobre as baleias jubarte é seu método de caça, o qual possui o comportamento de forrageamento denominado de método de alimentação com rede de bolhas, onde são criadas bolhas distintas ao longo de um círculo ou caminho em forma de “9”, sendo um comportamento único que só pode ser observado em baleias jubarte. Na Figura 5, é demonstrado o comportamento de alimentação de baleias jubarte com rede de bolhas.

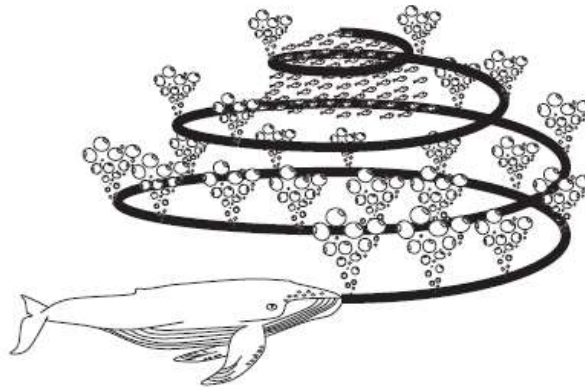


Figura 5 - Comportamento de alimentação com rede de bolhas de baleias jubarte [Mirjalili et al., 2016]

O algoritmo WOA é baseado no comportamento de caça das baleias jubarte, modelado e desenvolvido matematicamente para realizar a otimização com base na alimentação com a manobra de alimentação em rede de bolhas em espiral.

### **Modelo matemático e algoritmo de otimização:**

#### **Cercando a Presa:**

As baleias jubarte presas ao redor podem reconhecer a localização das presas e cercá-las. Como a posição do projeto ótimo no espaço de busca não é conhecida a priori, o algoritmo WOA assume que a melhor solução candidata atual é a presa-alvo ou está perto do ótimo. Depois que o melhor agente de pesquisa for definido, os outros agentes de pesquisa tentarão, portanto, atualizar suas posições em relação ao melhor agente de pesquisa. Este comportamento é representado pelas seguintes equações:

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (4.25)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4.26)$$

onde  $t$  indica a iteração atual,  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$  são coeficientes de vetores,  $\vec{X}^*$  é o vetor posição da melhor solução obtida até agora,  $\vec{X}$  é o vetor posição,  $||$  é o valor absoluto e  $\cdot$  é uma multiplicação elemento por elemento. Vale ressaltar aqui que  $\vec{X}^*$  deve ser atualizado a cada iteração se houver uma solução melhor. Os vetores  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$  são calculados da seguinte forma:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (4.27)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (4.28)$$

onde  $\vec{a}$  é linearmente diminuído de 2 para 0 ao longo das iterações (nas fases de exploração) e  $\vec{r}$  é um vetor aleatório em  $[0,1]$ .

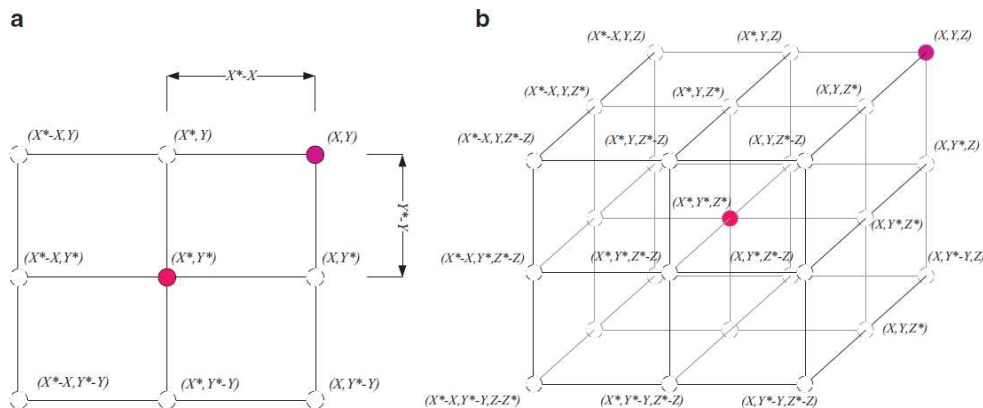


Figura 6 - Vetores de posição 2D e 3D e suas próximas localizações possíveis ( $X^*$  é a melhor solução obtida até agora) [Mirjalili et al., 2016]

A Figura 6 (a) ilustra a lógica por trás da Equação (4.26) para um problema 2D. A posição  $(X, Y)$  de um agente de pesquisa pode ser atualizada de acordo com a posição do melhor registro atual  $(X^*, Y^*)$ . Diferentes lugares ao redor do melhor agente podem ser alcançados em relação à posição atual ajustando o valor dos vetores  $\vec{A}$  e  $\vec{C}$ . A possível atualização da posição de um agente de busca no espaço 3D também é representada na Figura 6 (b). Deve-se notar que, ao definir o vetor aleatório ( $r$ ), é possível chegar a qualquer posição no espaço de busca localizado entre os pontos-chave mostrados na Figura 6. Portanto, a Equação (4.26) permite que qualquer agente de busca atualize sua posição na vizinhança da melhor solução atual e simule o cerco da presa. O mesmo conceito pode ser estendido a um espaço de busca com  $n$  dimensões, e os agentes de busca se moverão em hipercubos em torno da melhor solução obtida até o momento. Conforme mencionado anteriormente, as baleias jubarte também atacam

a presa com a estratégia da rede-bolha. Este método é formulado matematicamente da seguinte forma:

### Método de ataque por rede de bolhas (fase de exploração)

A fim de modelar matematicamente o comportamento da rede de bolhas de baleias jubarte, duas abordagens são projetadas como segue:

**1** Mecanismo de encolhimento de cercamento: Este comportamento é obtido diminuindo o valor de  $\vec{a}$  na Equação (4.27). Observe que a faixa de flutuação de  $\vec{A}$  também é diminuída em  $\vec{a}$ . Em outras palavras,  $\vec{A}$  é um valor aleatório no intervalo  $[-a, a]$  onde  $a$  diminui de 2 para 0 ao longo das iterações. Definindo valores aleatórios para  $\vec{A}$  em  $[-1, 1]$ , a nova posição de um agente de pesquisa pode ser definida em qualquer lugar entre a posição original do agente e a posição do melhor agente atual. A Figura 7 (a) mostra as posições possíveis de  $(X, Y)$  em direção a  $(X^*, Y^*)$  que podem ser alcançadas por  $0 \leq A \leq 1$  em um espaço 2D.

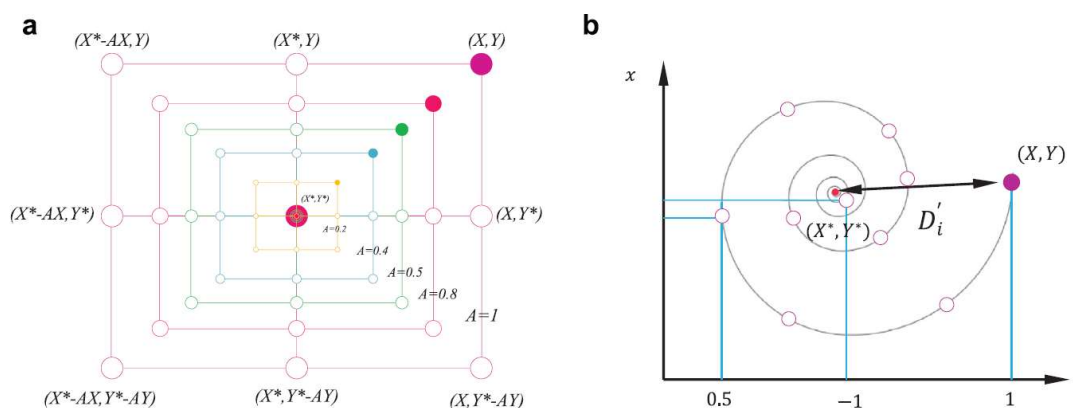


Figura 7 - Mecanismo de busca em rede de bolhas implementado no WOA ( $X^*$  é a melhor solução obtida até agora): (a) mecanismo de encolhimento e (b) posição de atualização da espiral [Mirjalili et al., 2016]

**2** Posição de atualização da espiral: Como pode ser visto na Figura 7 (b), esta abordagem primeiro calcula a distância entre a baleia localizada em  $(X, Y)$  e a presa localizada em  $(X^*, Y^*)$ . Uma equação em espiral é então criada entre a posição da baleia e da presa para imitar o movimento em forma de hélice das baleias jubarte da seguinte forma:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (4.29)$$



onde  $\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$  indica a distância da i-ésima baleia à presa (melhor solução obtida até agora),  $b$  é uma constante para definir a forma da espiral logarítmica,  $l$  é um número aleatório em  $[-1,1]$ . é uma multiplicação elemento por elemento. Observe que as baleias jubarte nadam ao redor da presa dentro de um círculo que diminui e ao longo de um caminho em forma de espiral simultaneamente. Para modelar este comportamento simultâneo, assume-se que há uma probabilidade de 50% de escolher entre o mecanismo de encolhimento ou o modelo espiral para atualizar a posição das baleias durante a otimização. O modelo matemático é o seguinte:

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (4.30)$$

onde  $p$  é um número aleatório em  $[0,1]$ . Além do método da rede de bolhas, as baleias jubarte procuram por presas aleatoriamente. O modelo matemático da pesquisa é o seguinte.

#### Busca de presas (fase de exploração)

A mesma abordagem baseada na variação do vetor  $\vec{A}$  pode ser utilizada para a busca de presas (exploração). Na verdade, as baleias jubarte procuram aleatoriamente de acordo com a posição umas das outras. Portanto, usa-se  $\vec{A}$  com os valores aleatórios maiores que 1 ou menores que -1 para forçar o agente de busca a se mover para longe de uma baleia de referência. Em contraste com a fase de exploração, atualiza-se a posição de um agente de busca na fase de exploração de acordo com um agente de busca escolhido aleatoriamente em vez do melhor agente de busca encontrado até agora. Este mecanismo e  $|\vec{A}| > 1$  enfatiza a exploração e permite que o algoritmo WOA execute uma pesquisa global. O modelo matemático é o seguinte:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \overline{X_{rand}} - \vec{X}| \quad (4.31)$$

$$\vec{X}(t+1) = \overline{X_{rand}} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4.32)$$

onde  $\overline{X_{rand}}$  é um vetor de posição aleatória (uma baleia aleatória) escolhido da população atual. Algumas das posições possíveis em torno de uma solução particular com  $\vec{A} > 1$  são mostradas na Figura 8. O algoritmo WOA começa com um conjunto de soluções aleatórias. A

cada iteração, os agentes de pesquisa atualizam suas posições com relação a um agente de pesquisa escolhido aleatoriamente ou à melhor solução obtida até o momento. O parâmetro  $a$  é diminuído de 2 para 0 a fim de fornecer exploração e aproveitamento, respectivamente. Um agente de pesquisa aleatório é escolhido quando  $|\vec{A}| > 1$ , enquanto a melhor solução é selecionada quando  $|\vec{A}| < 1$  para atualizar a posição dos agentes de pesquisa. Dependendo do valor de  $p$ , WOA pode alternar entre um movimento em espiral ou circular. Finalmente, o algoritmo WOA é finalizado pela satisfação de um critério de finalização.

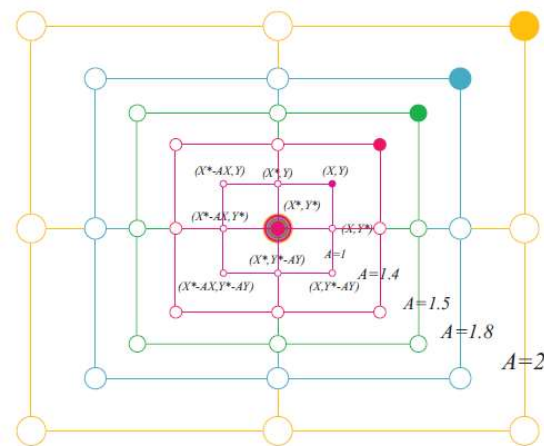


Figura 8 - Mecanismo de exploração implementado no WOA ( $X^*$  é um agente de busca escolhido aleatoriamente) [Mirjalili et al., 2016]

O pseudo-código do algoritmo WOA é apresentado na Figura 9. Do ponto de vista teórico, o WOA pode ser considerado um otimizador global porque inclui capacidade de exploração / aproveitamento. Além disso, o mecanismo hipercubo proposto define um espaço de busca na vizinhança da melhor solução e permite que outros agentes de busca explorem o melhor registro atual dentro daquele domínio. A variação adaptativa do vetor de busca  $A$  permite que o algoritmo WOA transite suavemente entre a exploração: ao diminuir  $A$ , algumas iterações são dedicadas à exploração ( $|A| \geq 1$ ) e o resto é dedicado à exploração ( $|A| < 1$ ). Notavelmente, o WOA inclui apenas dois parâmetros internos principais a serem ajustados ( $A$  e  $C$ ). Embora mutação e outras operações evolutivas possam ter sido incluídas na formulação WOA para reproduzir totalmente o comportamento das baleias jubarte, os autores do WOA decidiram minimizar a quantidade de heurísticas e o número de parâmetros internos, implementando assim uma versão muito básica do algoritmo WOA.

```

Inicialize a população de baleias  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )
Calcular a adequação de cada agente de pesquisa
 $X^*$  = o melhor agente de pesquisa
while ( $t <$  Máximo número de iterações)
  for each agente de pesquisa
    Atualizar  $a$ ,  $A$ ,  $l$  e  $p$ 
    If1 ( $p < 0.5$ )
      if2 ( $|A| \leq 1$ )
        Atualize a posição do agente de pesquisa atual pela equação (4.25)
      else if2 ( $|A| \geq 1$ )
        Selecione um agente de pesquisa aleatório ( $X_{rand}$ )
        Atualize a posição do agente de pesquisa atual pela Equação (4.32)
      end if2
    else if1 ( $p \geq 0.5$ )
      Atualize a posição do agente de pesquisa atual pela Equação (4.29)
    end if1
  end for
  Verificar se algum agente de pesquisa vai além do espaço de pesquisa e alterá-lo
  Calcule a adequação de cada agente de pesquisa
  Atualizar  $X^*$  se houver uma solução melhor
   $T = t + 1$ 
end while
retorna  $X^*$ 

```

Figura 9 – Pseudocódigo *Whale Optimization Algorithm* (WOA) [Adaptada de Mirjalili et al., 2016].

#### 4.7 Deslocamento Relativo entre Andares (*Drift*) – NSR-10

No Brasil não há predominância na ocorrência de sismos, da mesma maneira que em países como México, Colômbia, Índia, Japão, Nova Zelândia, etc. As normas tem como principal objetivo a definição de requisitos mínimos para dimensionar estruturas seguras nas quais estabelecem para pequenos sismos a estrutura permaneça intacta, enquanto para sismos

moderados os danos sejam limitados a elementos não estruturais, e para sismos fortes que se evite o colapso.

Por exemplo, o *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente* NSR-10 (AIS,2010) classifica a intensidade da atividade sísmica a partir da qual se determinam as características de solicitação da estrutura. Sendo considerados para a determinação do risco sísmico o tipo de construção, a sua respectiva função social e a natureza de sua ocupação. De acordo com o destino da obra utiliza-se a Tabela 3 denominada classificação da importância da construção, que tem por objetivo classificar as construções em grupos, considerando quais estruturas permanecem em perfeitas condições durante e depois de um terremoto e quais podem sofrer algum dano.

A limitação dos deslocamentos relativos entre andares é um parâmetro importante para a segurança das estruturas, devendo ser verificados se os deslocamentos apresentados pela estrutura podem implicar danos ou risco da perda de estabilidade para os elementos estruturais e não estruturais. Os deslocamentos relativos são limitados aos valores definidos na Tabela 2, sendo a variável  $h_{si}$  como a distância entre as duas elevações correspondentes ao pavimento em questão ou pé direito.

Tabela 2 – Limite para deslocamentos relativos entre pavimentos ( $\Delta x$ ) NSR-10.

<b>Tipo de estrutura</b>	<b>Deslocamento relativo máximo</b>
Concreto armado, aço e madeira	1% (0,010 $h_{si}$ )
Alvenaria estrutural	0,5% (0,005 $h_{si}$ )

Tabela 3 - Categorias de utilização e fatores de importância de utilização (I).

<b>Categorias</b>	<b>Natureza da ocupação</b>	<b>Fator I</b>
I	- Construções isoladas ou provisórias não destinadas à habitação, não classificadas em nenhuma das categorias	1,00
II	- Arquibancadas com mais de 2000 ocupantes; - Shoppings com áreas superiores a 500m <sup>2</sup> ; - Edificações nas quais os proprietários desejam segurança adicional em comparação ao grupo I; - Edifícios destinados à habitação privada ou ao uso público que não pertençam a nenhuma das categorias anteriores e construções de qualquer tipo cujo colapso pode pôr em risco outras construções das categorias IV e III.	1,10
III	- Estruturas para educação pré-escolar; - Escolas e universidades; - Instituições penitenciárias; - Edificações de bombeiros, e organismos de prevenção e atenção de desastre; - Bibliotecas, museus, etc.; - Estruturas que não foram consideradas no grupo IV.	1,25
IV	- Instituições de saúde; - Prédios de bombeiros, instituições de salvamento e policiais e garagens para veículos de emergência; - Instalações de geração de energia; - Torres de controle de aeroportos; - Estações de tratamento de água necessárias para o fornecimento de água; - Estruturas com funções para a Defesa Nacional; - Instalações contendo substâncias químicas ou tóxicas consideradas altamente perigosas.	1,50

Fonte NSR-10.

#### 4.8 Critérios para Conforto Humano

Além dos critérios de segurança quanto ao *Drift* com o objetivo de garantir a integridade e a segurança das estruturas sujeitas as ações dinâmicas, verifica-se também a questão do conforto aos usuários destas estruturas. O conforto é verificado através da aceleração a qual a estrutura está sujeita, sendo que dependendo da frequência da aceleração a qual os usuários estão sujeitos ocasiona desconforto, a qual remete a falta de concentração, tonturas (13 a 20Hz), enjoos, vontade de urinar (10 a 18Hz), dor no peito (5 a 7Hz), dor abdominal (4 a 10Hz), sensação geral de desconforto (4 a 9Hz), insegurança, influência nos movimentos respiratórios (4 a 8Hz), contrações musculares (4 a 9Hz), etc.

De acordo com Blessmann, 2005, os níveis de percepção e desconforto humano variam de imperceptível a intolerável, conforme a frequência versus amplitude da resposta dinâmica de uma estrutura. Na Figura 10 podem ser visualizados os níveis de conforto de acordo com estas classificações de percepção para estruturas sujeitas às ações do vento.

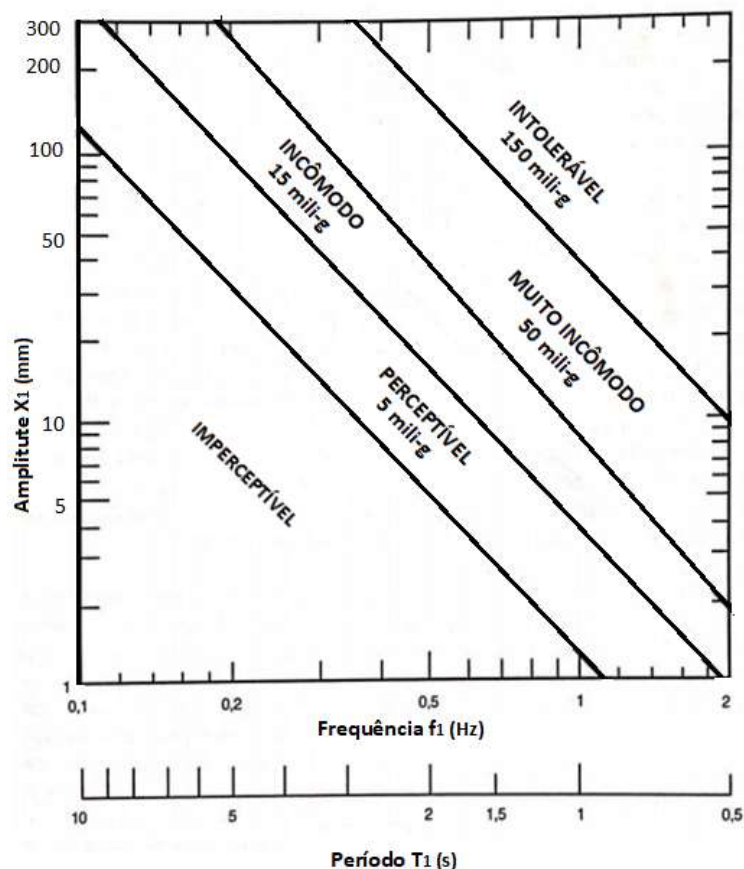


Figura 10 – Níveis de conforto frequência versus amplitude para estruturas sujeitas às ações do vento [Blessmann, 2005]

Blessmann, 2005 cita outro fator de influência na análise do conforto da estrutura como sendo o tempo de recorrência, devendo este ser menor que o utilizado para o cálculo estrutural.

Diversos estudos apresentam como um ano o tempo de recorrência para a análise de conforto dos usuários.

Em estruturas submetidas às ações do vento têm-se como referência duas normas sendo a Norma NBR 6123 / 1988 e a ISO 2631-1/1997.

A NBR 6123/1988 indica como nível limite de aceleração máxima em  $0,1\text{m/s}^2$ , na qual avalia o nível de conforto para os usuários.

A ISO 2631-1/1997, considera uma faixa de frequências a partir de 0,5Hz, através de três limites conforma cada grau de exposição, limite de exposição com perigo à saúde e limite de conforto. A norma possui métodos de medição de vibrações de corpo inteiro, em vibrações periódicas, aleatórias e transientes, com diferentes posições, em pé, sentado ou deitado.

#### **4.9 Determinação da validação dos parâmetros obtidos com a otimização e *Drift***

Para a validação dos parâmetros dos amortecedores para utilização como sistemas de controle, determinados através da otimização frente ao *Drift*, faz-se necessário seguir critérios padronizados. Como forma de validação, seleciona-se a FEMA P-1050 - Disposições sísmicas recomendadas pelo NEHRP para novos edifícios e outras estruturas, a qual estipula os procedimentos de história de resposta sísmica para a escolha dos sismos. De acordo com o capítulo 16, uma análise de histórico de resposta, consistindo na determinação da resposta de um modelo matemático da estrutura para conjuntos de históricos de aceleração de movimento do solo, deve ser realizada de acordo com os requisitos e critérios de aceitação.

##### **4.9.1 Critérios**

A análise deve ser baseada no nível de movimento de solo Máximo Considerado para Terremoto (MCER), onde dois ou mais espectros de resposta ao alvo específicos do local devem ser desenvolvidos e um conjunto de movimento de solo deve ser desenvolvido para cada espectro de resposta alvo. Para tanto, devem ser atendidos os seguintes critérios:

- Devem ser selecionados dois ou mais períodos, correspondentes aos períodos de vibração que contribuem significativamente para a resposta dinâmica inelástica do edifício;
- Para cada período selecionado, um espectro alvo deve ser criado que corresponda ou exceda o valor do MCER naquele período;
- O envelope dos espectros alvo não deve ser inferior a 75% dos valores espectrais calculados;
- Para cada espectro de resposta de destino, um conjunto de movimento de solo para análises de histórico de resposta deve ser desenvolvido e utilizado.

#### 4.9.2 Seleção de movimentos de solo

Os movimentos do solo devem ser selecionados a partir de eventos dentro do mesmo regime tectônico geral e tendo magnitudes e distâncias de falha geralmente consistentes como aqueles que controlam o nível máximo considerado de movimento de solo do terremoto.

#### 4.9.3 Faixa de período para escala

Para fins de dimensionamento do movimento do solo, uma faixa de período de escala deve ser determinada, correspondendo a períodos de vibração que contribuem significativamente para a resposta dinâmica do edifício. Esta faixa de período deve ter um limite superior maior ou igual a duas vezes o maior período do primeiro modo nas direções horizontais ortogonais de resposta, a menos que um valor inferior seja justificado por análise dinâmica em movimentos de solo MCER. Em nenhum caso, o limite superior deve ser inferior a 1,5 vezes o maior período do primeiro modo nas direções ortogonais horizontais de resposta. O limite inferior do período deve ser estabelecido de modo que a faixa do período inclua pelo menos o número de modos elásticos necessários para atingir 90% da participação da massa em cada direção horizontal ortogonal. O período do limite inferior não deve exceder 20% do menor período do primeiro modo para as duas direções horizontais ortogonais de resposta.

#### 4.9.4 *Drift*

A proporção média de *Drift* não deve exceder duas vezes os limites da Tabela 12.12-1 – *Design coefficients and factors for seismic force-Resisting systems*, a qual pode ser encontrada no ASCE7-10. De acordo com o ASCE 07-16 são necessários 7 sinais de terremotos para a validação.

#### 4.10 Etapas da Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho, é necessário realizar o detalhamento das etapas da metodologia com o objetivo de obtenção da minimização da resposta dinâmica de edifícios submetidos a sismos através da otimização robusta de MTMD. A metodologia é dividida em 5 etapas, as quais são mostradas na Figura 11, sendo detalhadas nas figuras 12 a 19.



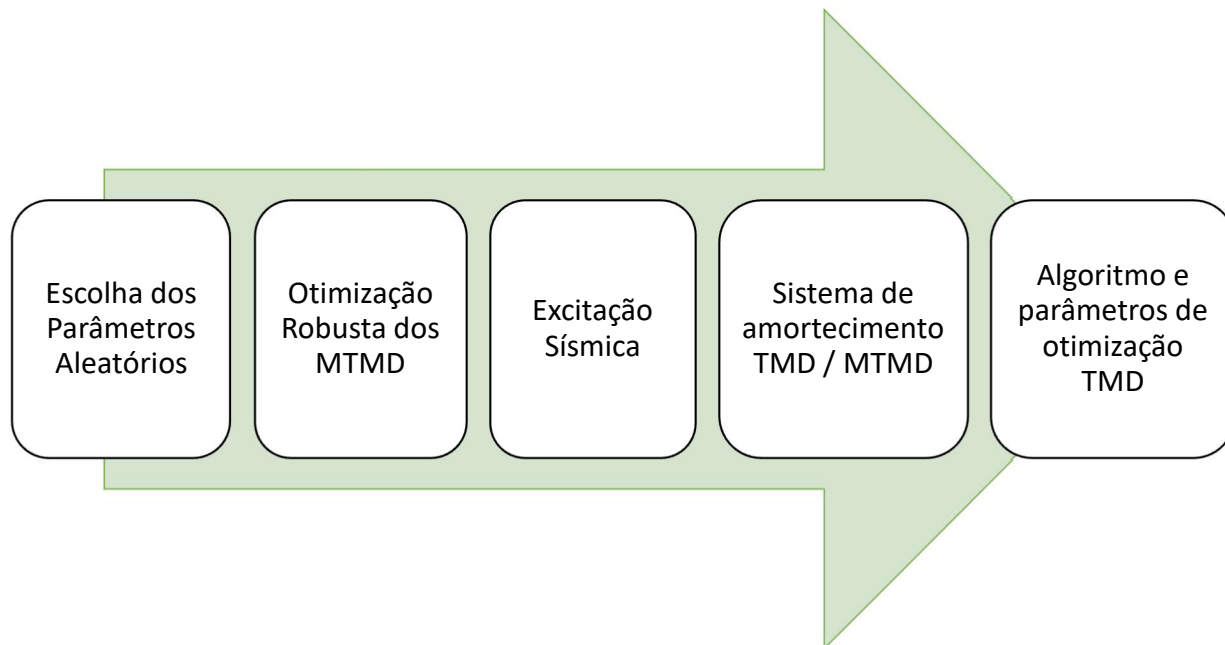


Figura 11 – Esquema das várias etapas da metodologia [Próprio Autor, 2022]

A primeira etapa refere-se a escolha e definição dos parâmetros aleatórios: do edifício, do's TMD's e dos sismos, conforme mostrado na Figura 12. Para cada um dos valores são considerados os valores médios e coeficientes de variação com distribuição lognormal. Como parâmetros do edifício, devem ser definidos a massa, a rigidez e o amortecimento. Para os parâmetros dos TMD's devem ser definidos os valores de rigidez e amortecimento. Já para os parâmetros da excitação sísmica devem ser considerados a frequência do solo, o PGA e o amortecimento do solo.

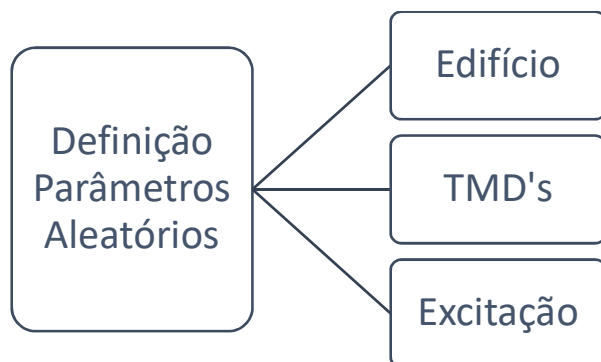


Figura 12 – Escolha dos parâmetros aleatórios [Próprio Autor, 2022]

A segunda etapa refere-se a escolha da função objetivo para a otimização robusta dos TMDs, conforme Figura 13. A escolha da função objetivo é dividida em 4 opções, sendo a resposta em termos de: aceleração, velocidade, deslocamento ou *Drift*. No caso do trabalho alterna-se a função objetivo entre *Drift* e aceleração.

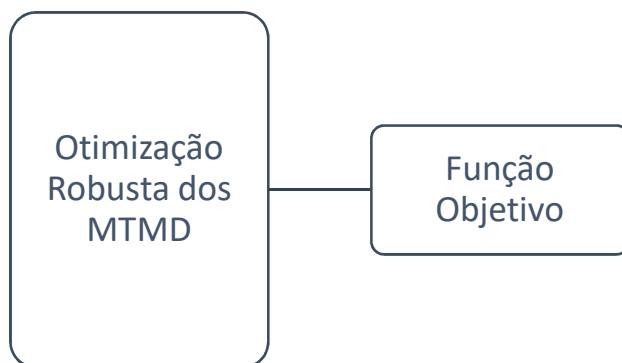


Figura 13 – Otimização Robusta dos MTMD [Próprio Autor, 2022]

Como terceira etapa, considera-se a escolha dos parâmetros da Excitação Sísmica, conforme exposto na Figura 14. A definição da excitação sísmica é dividida em Tempo e intervalo de tempo entre uma integração e outra.

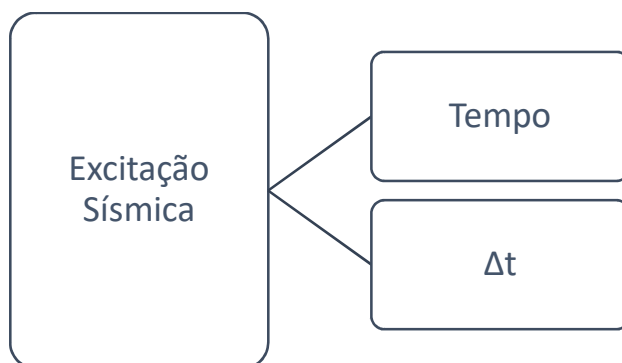


Figura 14 – Escolha dos parâmetros da Excitação Sísmica [Próprio Autor, 2022]

Na sequência, na quarta etapa efetua-se a definição dos limites das variáveis de projeto a adotar, conforme exposto na Figura 15. As variáveis de projeto são consideradas os limites de *upper e lower bound* para os TMD's.

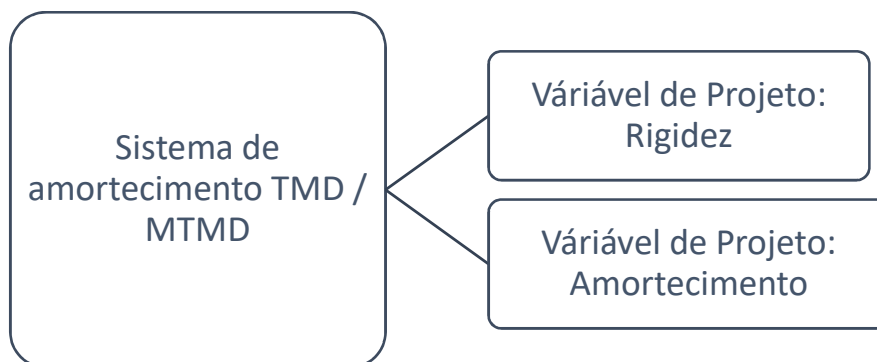


Figura 15 – Escolha dos limites das variáveis de projeto do sistema de amortecimento [Próprio Autor, 2022]

E por fim faz-se a seleção de qual algoritmo adotar, bem como, o número de agentes, número de iterações e número de amostras, conforme exposto na Figura 16. Conforme aumenta o número de agentes, iterações e amostras, aumenta-se consequentemente o tempo computacional. No entanto, este aumento não reflete diretamente em uma melhor resposta. Visto a estabilização do sistema, o qual é percebido através da estabilização das curvas de convergência.

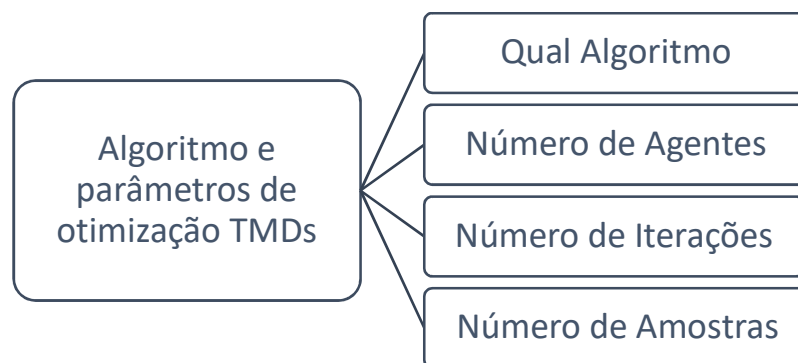


Figura 16 – Escolha do Algoritmo e respectivos Parâmetros [Próprio Autor, 2022]

Com a definição dos passos das etapas 1 a 5 expostos nas Figuras 10 a 14, efetua-se a definição dos parâmetros ótimos do TMD / MTMD levando em considerações os 3 cenários e as funções objetivo alterando entre *Drift* e Aceleração, conforme exposto nas Figuras 17 e 18. Primeiramente efetua-se a definição dos parâmetros ótimos com a função objetivo *Drift*, afim de efetuar posteriormente a verificação da eficácia destes parâmetros dos TMD's frente a excitação de sismos reais. Após, efetua-se a troca da função objetivo para aceleração, afim de verificar a questão da redução da aceleração e o conforto aos usuários.

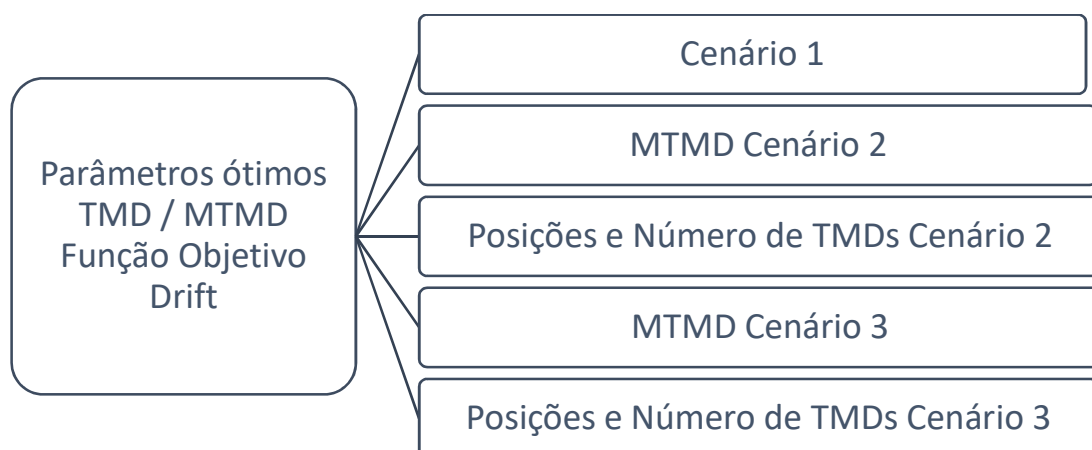


Figura 17 – Escolha dos Parâmetros ótimos com função objetivo *Drift* [Próprio Autor, 2022]

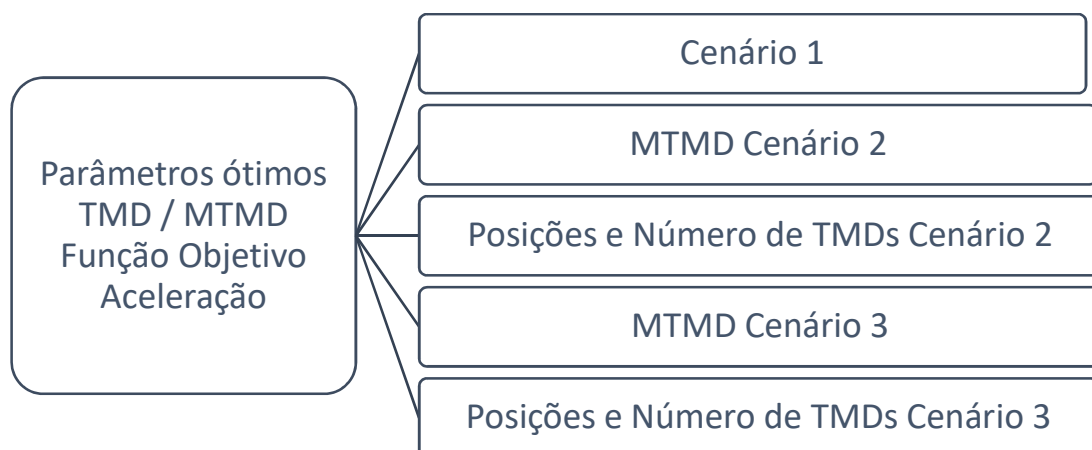


Figura 18 – Escolha dos Parâmetros ótimos com função objetivo *Aceleração* [Próprio Autor, 2022]

Por fim, efetua-se a verificação dos parâmetros dos TMD's obtidos com a função objetivo *Drift* (Figuras 17 e 18) frente a terremotos reais, conforme exposto na Figura 19. Efetua-se a busca de sinais de sismos reais com os critérios de acordo com a Fema P-1050 para a validação da eficácia dos parâmetros dos TMD's obtidos com a função objetivo *Drift*.

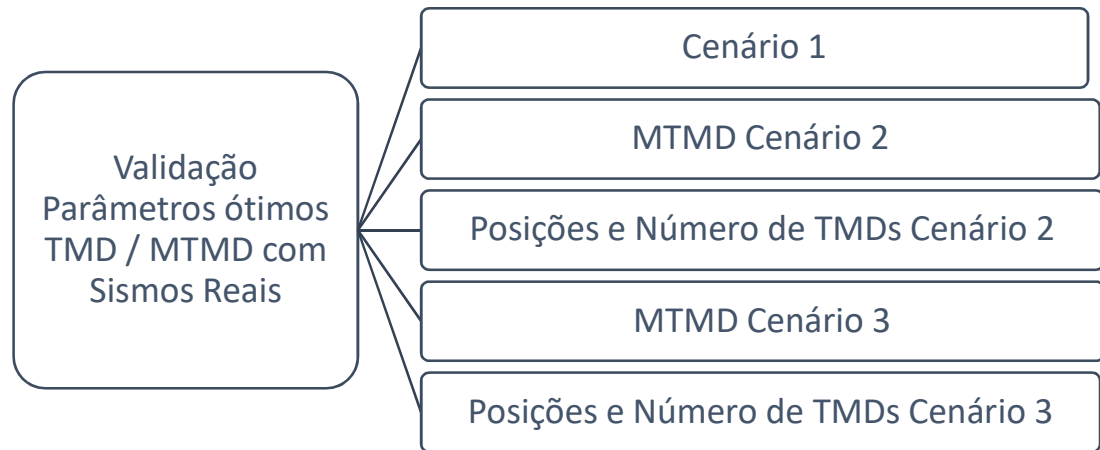


Figura 19 – Verificação dos Parâmetros ótimos com função objetivo *Drift* e Sismos Reais  
[Próprio Autor, 2022]

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Dados Utilizados

Para ilustrar a eficácia da metodologia de otimização robusta de MTMD proposta nesta tese com o objetivo de minimizar a resposta dinâmica de edifícios submetidos a sismos, um edifício de 10 andares, já estudado por outros autores da literatura (ex. Mohebbi et al., 2013) é analisado. O edifício é modelado como *shear building*, com distância entre andares de 3 metros e é apresentado na Figura 1.

#### 5.1.1 Parâmetros Aleatórios do Edifício, dos TMDs e da Excitação

Os valores adotados para os parâmetros da estrutura (massa, rigidez e amortecimento), os parâmetros dos MTMD (rigidez e amortecimento), bem como, os parâmetros da excitação sísmica (aceleração máxima do solo, frequência do solo e amortecimento do solo) são modelados como variáveis aleatórias com distribuição LogNormal, com coeficientes de variação e valores médios conhecidos. Estes valores médios e coeficientes de variação de cada parâmetro são apresentados na Tabela 4. O valor adotado para o coeficiente de variação de cada uma das variáveis é baseado nas definições da bibliografia. O coeficiente de variação para a estrutura (massa e rigidez), assim como, para os parâmetros do TMD (rigidez e amortecimento) são semelhantes a Miguel et al., 2016 (*Failure probability minimization of buildings through passive friction dampers*). Para o amortecimento da estrutura o coeficiente de variação segue de acordo ao levantamento realizado no artigo de Lago, 2019. E para os parâmetros da excitação sísmica (aceleração máxima do solo, frequência do solo e amortecimento do solo) o coeficiente de variação é baseado nos parâmetros estipulados por Mohebbi et al., 2013.

Tabela 4 - Valor médio e coeficiente de variação de cada variável aleatória de entrada.

Variável Aleatória	Valor Médio	Coefficiente de Variação (%)
Massa por andar	360t	5
Rigidez por andar	650MN/m	5
Amortecimento por andar	6.2MNs/m	25,9
Constante de rigidez para cada TMD	Variável de design	5
Constante de amortecimento para cada TMD	Variável de design	5
PGA	0,475g	10
$\omega_g$	18 rad/s	10
$\zeta_g$	0,6	10

Fonte Próprio Autor.

As frequências naturais da estrutura, considerando as propriedades médias sem os coeficientes de variação, isto é,  $CV=0\%$ , sem os MTMD, resultam em Hz: 1,01; 3,00; 4,94; 6,76; 8,43; 9,91; 11,18; 12,19; 12,93; 13,38.

### 5.1.2 Otimização Robusta dos MTMD

O projeto de otimização robusta dos MTMD demanda alguns parâmetros para minimizar o valor esperado do máximo *Drift*  $E[D_{\max}]$ . Estes parâmetros são necessários pois para a obtenção da função objetivo, se faz necessária a determinação do vetor  $\vec{x}(t)$  que é obtido resolvendo-se a Equação (4.1) através do método de Newmark.

Em virtude da estrutura a ser otimizada ser um prédio modelado como *shear building* de 10 andares, consideram-se 10 graus de liberdade.

### 5.1.3 Excitação Sísmica

A excitação sísmica é simulada através da geração de terremotos aleatórios pelo método de Kanai-Tajimi com intervalo de tempo de 0,02s e tempo de duração de 20s.

#### 5.1.4 Sistema de Amortecimento TMD / MTMD

Para o controle de vibrações, a determinação dos parâmetros do sistema de amortecimento (TMD/MTMD) é feita através da otimização de três cenários distintos com os parâmetros das variáveis conforme Tabela 4.

Os valores limites para as variáveis de projeto de cada um dos TMD são: rigidez ( $5kN/m \leq E [k_{TMD}] \leq 5000kN/m$ ) e amortecimento ( $1kNs/m \leq E [c_{TMD}] \leq 1000kNs/m$ ), para os três cenários.

Cenário 1: Primeiramente considera-se a instalação de um único TMD no topo do edifício, desta forma, adiciona-se um único grau de liberdade à estrutura. A massa total do TMD é considerada como 3% da massa total do edifício, conforme sugerido na literatura.

Para os cenários 2 e 3, consideram-se os 10 graus de liberdade da estrutura a ser otimizada e a possibilidade de se instalar um máximo de até 10 TMDs (conforme sugerido por Mohebbi et al., 2013), com configurações de distribuição horizontal (cenário 2) e vertical (cenário 3). As restrições são o número e locais possíveis para os TMDs ( $n_{pTMD} = 10$ ). O número máximo de amortecedores a serem instalados na estrutura é limitado em 10 TMDs ( $n_{TMD} = 10$ ). As posições são consideradas variáveis de projeto discretas, enquanto os parâmetros como rigidez e amortecimento dos MTMD são consideradas variáveis de projeto contínuas.

Cenário 2: Considera-se a possibilidade de se instalar um máximo de até 10 TMDs no topo da estrutura, configurando uma distribuição horizontal, ou seja, até 10 TMDs todos posicionados no topo do edifício. A massa total dos TMDs é considerada como sendo 3% da massa total do edifício.

Cenário 3: Configuração de distribuição vertical, a qual considera a possibilidade de se instalar um máximo de até 10 TMDs distribuídos na estrutura, ou seja, um máximo de 1 TMD por andar. Novamente, assim como nos cenários 1 e 2, a massa total dos TMDs é considerada como sendo 3% da massa total do edifício.

#### 5.1.5 Algoritmos e parâmetros da otimização

Conforme exposto anteriormente, a escolha de qual algoritmo usar, assim como, a determinação de seus parâmetros para otimização, não é uma tarefa fácil. Cada algoritmo



apresenta resultados melhores para determinados tipos de função objetivo. O desenvolvimento de novos algoritmos, vem sendo realizado cada vez mais por pesquisadores, visando ferramentas mais robustas e com menor tempo de otimização.

Neste trabalho serão consideradas 3 opções de algoritmos metaheurísticos para a otimização: *Butterfly optimization algorithm* (BOA), *Grey Wolf Optimizer* (GWO) e *Whale Optimization Algorithm* (WOA). Estas 3 opções são ferramentas desenvolvidas nos últimos anos e foram selecionadas pelo fato de terem sido desenvolvidas recentemente, além de que no decorrer do desenvolvimento do trabalho de minha dissertação de mestrado (Vellar, 2017), bem como, no desenvolvimento de artigos, outros algoritmos mais “antigos” foram usados, como por exemplo: Yang, 2009 (*Firefly Algorithm* - FA), Civivioglu, 2013 (*Backtracking Search Optimization Algorithm* - BSA), e Gonçalves, 2015 (*Search Group Algorithm* - SGA), desenvolvidos nos anos 2009, 2013 e 2015 respectivamente.

Neste contexto, para a escolha de qual dos 3 algoritmos adotar, serão feitos testes para a validação, com os critérios que são descritos a seguir.

Além da escolha do algoritmo, destaca-se também a necessidade de determinação do número de agentes (número de indivíduos), número de iterações e número de amostras (número de parâmetros diferentes para cada uma das variáveis aleatórias). Para a determinação destes fatores, é imprescindível que a cada simulação o resultado obtido na função objetivo seja muito próximo, o que indica a robustez do método.

Para a determinação de qual algoritmo adotar, assim como, para a determinação do número de agentes, de amostras e de iterações, através das curvas de convergência, juntamente com os resultados obtidos na função objetivo, foram feitas 9 simulações com diferentes configurações, alterando os parâmetros de otimização, as quais são mostradas na Tabela 5. Os resultados para cada uma das simulações são mostrados na Tabela 6. Para esta determinação, as simulações foram realizadas adotando o cenário 3, o qual considera a possibilidade de instalação de no máximo 10 TMD's com distribuição vertical.

Tabela 5 – Configurações dos parâmetros da otimização

<b>Número de Agentes</b>	<b>Número de Iterações</b>	<b>Número de Amostras</b>
20	100	30
30	40	30
30	100	30
40	20	30
40	40	30
50	15	30
50	15	50
50	30	30
50	50	50

Fonte Próprio Autor.

Primeiramente, antes da definição dos parâmetros (número de agentes, número de iterações e número de amostras) é feita a definição de qual algoritmo adotar. Para esta definição verifica-se qual a melhor resposta através da função objetivo, juntamente com o tempo de simulação, o número de TMD's e a convergência com cada uma das configurações mostradas na Tabela 6. Os resultados para cada uma das simulações mostradas na Tabela 6 de forma condensada, são mostrados nas Tabelas 7 a 15 para cada uma das configurações. Após a definição do algoritmo, baseado na Tabela 6, através das Tabelas 7 a 15, é feita a definição da melhor configuração para a determinação dos parâmetros a adotar para as demais simulações ao longo da tese, ou seja, para as simulações de *Drift* como função objetivo para os 3 cenários, bem como, aceleração como função objetivo para definição da possibilidade de se obter conforto, além de verificar ambas as respostas frente aos terremotos reais.

Tabela 6 – Simulações para determinação do algoritmo e parâmetros de otimização.

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	20	100	30	6:46	10	67	1,3187E-02	13,187
BOA	20	100	30	6:44	1	15	1,2373E-02	12,373
BOA	30	40	30	4:06	3	3	1,1766E-02	11,766
BOA	30	100	30	15:18	1	75	1,0443E-02	10,443
BOA	40	20	30	2:47	4	11	1,3419E-02	13,419
BOA	40	40	30	13:37	7	21	1,2955E-02	12,955
BOA	50	15	30	2:38	1	4	1,3866E-02	13,866
BOA	50	15	30	2:39	1	3	1,3822E-02	13,822
BOA	50	15	30	2:37	2	12	1,1851E-02	11,851
BOA	50	15	50	4:21	5	9	1,3944E-02	13,944
BOA	50	30	30	5:12	2	10	1,0238E-02	10,238
BOA	50	50	50	14:06	3	4	1,0760E-02	10,76
GWO	20	100	30	2:17	8	95	1,3603E-02	13,603
GWO	20	100	30	2:19	5	37	1,2625E-02	12,625
GWO	20	100	30	2:20	7	85	1,2509E-02	12,509
GWO	20	100	30	2:15	2	68	1,1142E-02	11,142
GWO	30	40	30	1:25	7	8	1,2295E-02	12,295
GWO	30	100	30	2:28	9	33	1,0549E-02	10,549
GWO	40	20	30	0:59	5	6	1,2400E-02	12,4
GWO	40	40	30	1:47	9	36	1,1849E-02	11,849
GWO	40	40	30	1:52	6	10	1,2088E-02	12,088
GWO	50	15	30	1:01	3	9	1,3490E-02	13,490
GWO	50	15	30	0:55	5	3	1,5255E-02	15,255
GWO	50	15	30	0:51	2	6	1,4353E-02	14,353
GWO	50	15	50	1:22	7	5	1,1280E-02	11,280
GWO	50	15	50	1:23	10	8	1,2363E-02	12,363
GWO	50	30	30	1:49	9	13	1,2487E-02	12,487
GWO	50	50	50	4:30	1	40	1,2151E-02	12,151
GWO	50	50	50	4:55	8	25	1,2571E-02	12,571
GWO	50	50	50	4:58	8	24	1,2265E-02	12,265
WOA	20	100	30	2:16	5	93	1,2438E-02	12,438
WOA	20	100	30	2:20	7	18	1,2416E-02	12,416
WOA	20	100	30	2:17	7	22	1,1554E-02	11,554
WOA	30	40	30	1:32	7	35	1,1244E-02	11,244
WOA	30	100	30	3:27	9	87	1,1775E-02	11,775
WOA	40	20	30	3:01	4	2	1,3326E-02	13,326
WOA	40	40	30	1:52	6	32	1,4483E-02	14,483
WOA	50	15	30	1:00	5	14	1,5205E-02	15,205
WOA	50	15	30	1:00	9	3	1,3365E-02	13,365
WOA	50	15	50	1:37	1	8	1,3330E-02	13,33
WOA	50	15	50	1:37	10	5	1,5159E-02	15,159
WOA	50	30	30	1:59	2	25	1,4402E-02	14,402
WOA	50	50	50	5:05	1	42	1,4261E-02	14,261

Fonte Próprio Autor.

Com base nos dados mostrados na Tabela 6, verifica-se que para os resultados de *Drift* dados em milímetros, o BOA apresenta uma média de 12,385mm com desvio padrão de 1,30mm, enquanto o GWO apresenta uma média de 12,515mm com desvio padrão de 1,08mm, e o WOA apresenta uma média de 13,304mm com desvio padrão de 1,29mm. Ao avaliar os resultados quanto ao *Drift* verifica-se que independente dos parâmetros adotados para a otimização, quanto ao número de agentes, número de iterações e número de amostras o GWO se caracteriza por ter um menor desvio padrão. No quesito tempo, verifica-se que o BOA é bem mais demorado para gerar os mesmos dados quando comparado ao GWO e ao WOA, os quais são semelhantes. Comparando o número de TMD's, verifica-se uma média de 3,3 e desvio padrão de 2,69 para o BOA, enquanto o GWO a média é de 6,17 TMD's com desvio padrão de 2,65 e o WOA a média é de 5,62 TMD's com desvio padrão de 2,87.

De acordo com os dados estatísticos, apesar de o BOA apresentar um número menor de TMD's, os resultados de *Drift* oscilam mais, ou seja, possuem um maior desvio padrão, assim como, um maior tempo de processamento, se comparado ao GWO e ao WOA. Ao comparar o GWO ao WOA, apesar de o WOA apresentar um menor número de TMD's que o GWO, o WOA apresenta um desvio padrão maior que o GWO no resultado de *Drift*. Desta forma, adota-se preliminarmente o algoritmo GWO para a realização das demais etapas da tese, já que o tempo de processamento do GWO e WOA são semelhantes. A avaliação dos parâmetros de otimização será feita através da análise de cada uma das configurações apresentadas na Tabela 5.

Tabela 7 – Configuração 1: 20 Agentes, 100 Iterações e 30 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	20	100	30	6:46	10	67	1,3187E-02	13,187
BOA	20	100	30	6:44	1	15	1,2373E-02	12,373
GWO	20	100	30	2:17	8	95	1,3603E-02	13,603
GWO	20	100	30	2:19	5	37	1,2625E-02	12,625
GWO	20	100	30	2:20	7	85	1,2509E-02	12,509
GWO	20	100	30	2:15	2	68	1,1142E-02	11,142
WOA	20	100	30	2:16	5	93	1,2438E-02	12,438
WOA	20	100	30	2:20	7	18	1,2416E-02	12,416
WOA	20	100	30	2:17	7	22	1,1554E-02	11,554

Fonte Próprio Autor.

Ao avaliar os dados da Tabela 7, verifica-se que independente do algoritmo, os resultados de *Drift* oscilam, juntamente com a convergência e o número de TMD's, o que indica que não há uma boa configuração para os parâmetros de otimização. Desta forma faz-se a alteração do número de agentes, passando de 20 para 30, bem como a alteração do número de iterações, passando de 100 para 40, conforme exposto na Tabela 8.

Tabela 8 – Configuração 2: 30 Agentes, 40 Iterações e 30 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	30	40	30	4:06	3	3	1,1766E-02	11,766
GWO	30	40	30	1:25	7	8	1,2295E-02	12,295
WOA	30	40	30	1:32	7	35	1,1244E-02	11,244

Fonte Próprio Autor.

Verifica-se na Tabela 8, que com a alteração de número de agentes e iterações, o número de TMD's já é igual quando se comparam GWO com WOA, porém os resultados de *Drift* e convergência são distintos. Faz-se então a alteração do número de iterações de 40 para 100, os quais podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Configuração 3: 30 Agentes, 100 Iterações e 30 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	30	100	30	15:18	1	75	1,0443E-02	10,443
GWO	30	100	30	2:28	9	33	1,0549E-02	10,549
WOA	30	100	30	3:27	9	87	1,1775E-02	11,775

Fonte Próprio Autor.

Da mesma forma como mostrado na Tabela 8, na Tabela 9 ocorre a igualdade do número de TMD's, mas segue a diferença entre os resultados de *Drift* e convergência para o GWO e WOA. Enquanto que o BOA apresenta uma variação bem mais significativa, o que nos leva a verificar uma certa instabilidade para o problema. A ideia não é que os algoritmos apresentem os mesmos resultados, mas que sejam mais constantes quando comparados a eles mesmos, com a alteração dos parâmetros de otimização, ou seja, mais robustos quanto aos resultados. Desta forma, efetua-se a alteração do número de agentes e número de iterações, passando de 30 para 40 e de 100 para 20 respectivamente, sendo estes resultados mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Configuração 4: 40 Agentes, 20 Iterações e 30 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	40	20	30	2:47	4	11	1,3419E-02	13,419
GWO	40	20	30	0:59	5	6	1,2400E-02	12,4
WOA	40	20	30	3:01	4	2	1,3326E-02	13,326

Fonte Próprio Autor.

Com base na Tabela 10, verifica-se ainda a proximidade do número de TMD's, mesmo que os resultados ainda não sejam próximos comparando com a Tabela 9, no entanto, a convergência já está mais estabilizada. Sendo assim, efetua-se a alteração do número de iterações, passando de 20 para 40, sendo os resultados mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Configuração 5: 40 Agentes, 40 Iterações e 30 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	40	40	30	13:37	7	21	1,2955E-02	12,955
GWO	40	40	30	1:47	9	36	1,1849E-02	11,849
GWO	40	40	30	1:52	6	10	1,2088E-02	12,088
WOA	40	40	30	1:52	6	32	1,4483E-02	14,483

Fonte Próprio Autor.

Ao efetuar a alteração do número de iterações, já se verifica através da Tabela 11, que os algoritmos GWO e WOA, assim como a conclusão geral dos algoritmos, apresenta número de TMD's semelhantes, bem como, um resultado de *Drift* menor para o GWO, mostrando

que a ferramenta é robusta para os dois algoritmos com este número de agentes, iterações e amostras. No entanto, com o intuito de verificar ainda mais a robustez e a validação dos parâmetros de otimização, efetua-se a alteração do número de agentes para 50 comparado aos 40 anteriores, e o número de iterações passa-se de 40 para 15, sendo os dados mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Configuração 6: 50 Agentes, 15 Iterações e 30 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	50	15	30	2:38	1	4	1,3866E-02	13,866
BOA	50	15	30	2:39	1	3	1,3822E-02	13,822
BOA	50	15	30	2:37	2	12	1,1851E-02	11,851
GWO	50	15	30	1:01	3	9	1,3490E-02	13,490
GWO	50	15	30	0:55	5	3	1,5255E-02	15,255
GWO	50	15	30	0:51	2	6	1,4353E-02	14,353
WOA	50	15	30	1:00	5	14	1,5205E-02	15,205
WOA	50	15	30	1:00	9	3	1,3365E-02	13,365

Fonte Próprio Autor.

Verifica-se que através da alteração, conforme mostrada na Tabela 12, mesmo com o aumento do número de agentes, com o número de iterações baixo, ainda mostra instabilidade nos resultados, diferentemente do que ocorreu com os dados gerados através de um número maior de iterações, através da comparação das Tabelas 10 e 11. Na Tabela 13 são mostrados os dados com a alteração de número de amostras, de 30 para 50 quando comparada a Tabela 12.



Tabela 13 – Configuração 7: 50 Agentes, 15 Iterações e 50 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	50	15	50	4:21	5	9	1,3944E-02	13,944
GWO	50	15	50	1:22	7	5	1,1280E-02	11,280
GWO	50	15	50	1:23	10	8	1,2363E-02	12,363
WOA	50	15	50	1:37	1	8	1,3330E-02	13,33
WOA	50	15	50	1:37	10	5	1,5159E-02	15,159

Fonte Próprio Autor.

Ao comparar os resultados de *Drift* das simulações da Tabela 13 com os da Tabela 12, verifica-se que ainda ocorrem variações, o que indica a necessidade de alteração do número de iterações, pois ainda não se obteve a estabilização dos resultados de *Drift*, nem tampouco do número de TMD's. Na Tabela 15 efetuam-se as simulações com a adequação do número de agentes de 15 para 30, além de reduzir o número de amostras de 50 para 30.

Tabela 14 – Configuração 8: 50 Agentes, 30 Iterações e 30 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	50	30	30	5:12	2	10	1,0238E-02	10,238
GWO	50	30	30	1:49	9	13	1,2487E-02	12,487
WOA	50	30	30	1:59	2	25	1,4402E-02	14,402

Fonte Próprio Autor.

Ao se comparar os dados da Tabela 14 com a Tabela 13, verifica-se que para qualquer um dos algoritmos a variação do *Drift* ainda ocorre. Desta forma efetua-se novamente a alteração do número de iterações e de amostras, passando de 30 para 50 em ambos. Na Tabela 15 são apresentados os resultados das simulações com as alterações.

Tabela 15 – Configuração 9: 50 Agentes, 50 Iterações e 50 Amostras

Algoritmo	Nº Agentes	Iterações	Amostra	Tempo [Horas]	Nº TMD's	Convergência	Resultado [m]	Resultado [mm]
BOA	50	50	50	14:06	3	4	1,0760E-02	10,76
GWO	50	50	50	4:30	1	40	1,2151E-02	12,151
GWO	50	50	50	4:55	8	25	1,2571E-02	12,571
GWO	50	50	50	4:58	8	24	1,2265E-02	12,265
WOA	50	50	50	5:05	1	42	1,4261E-02	14,261

Fonte Próprio Autor.

Ao se efetuar um comparativo entre os resultados com esta alteração mostrada na Tabela 15 e os dados de *Drift* mostrados na Tabela 14, verifica-se que para qualquer um dos algoritmos os resultados se mantêm praticamente os mesmos, o que demonstra a robustez e a estabilidade dos algoritmos com os parâmetros de otimização. No entanto, para confirmar a escolha do algoritmo GWO, através destes parâmetros, verifica-se que além de o *Drift* praticamente não alterar, o número de TMD's também se mantêm constante, assim como, a convergência. Já com o BOA e o WOA o *Drift* praticamente não altera, mas o número de TMD's e a convergência sim.

Assim, o algoritmo a adotar para a realização das simulações com os 3 cenários, tanto para *Drift*, quanto para possibilidade de obtenção do conforto, será o *Grey Wolf Optimizer* – GWO. Os parâmetros de otimização são uma população *Search Agents* = 50 indivíduos, número de iterações *Max iteration* = 50, totalizando 2500 avaliações. Juntamente com estas 2500 avaliações, são consideradas 50 amostras, ou seja, 50 parâmetros diferentes para cada uma das variáveis aleatórias.

Após a definição de qual algoritmo, juntamente com os parâmetros do algoritmo a adotar, são feitas as simulações para definir os parâmetros do(s) TMD/MTMD utilizando a função objetivo “*Drift*”. Após a definição dos parâmetros utilizando o *Drift* como função objetivo, esta é alterada para aceleração, da qual se verifica a possibilidade de se obter o conforto. Por fim, volta-se a utilizar a função objetivo com *Drift*, porém, como excitação, adotam-se terremotos reais. A utilização dos terremotos reais tem como objetivo validar os parâmetros gerados através do terremoto gerado artificialmente, para verificação da eficácia do método.

## 5.2 Resultados da Otimização Robusta

A cada rodada do algoritmo é gerado um sinal de excitação diferente, assim como uma estrutura com parâmetros diferentes, com valores médios e coeficientes de variação listados na Tabela 4. Desta forma se pode verificar na Figura 20 a densidade espectral de um dos sinais gerados para excitação.

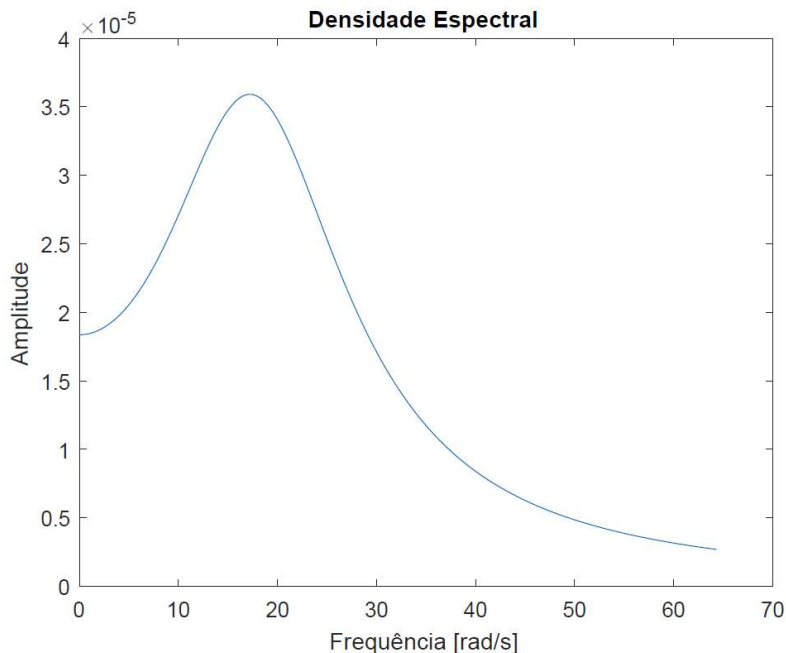


Figura 20 - Densidade Espectral - Sinal da Excitação por Kanai-Tajimi.

Na Figura 21, a título de ilustração, é apresentado o gráfico de um dos 50 acelerogramas gerados no presente estudo. Como se pode observar, o valor do pico de aceleração está dentro do estipulado, com  $PGA=0,475g$ , sendo  $g$  a aceleração da gravidade, igual a  $9,80665m/s^2$ .

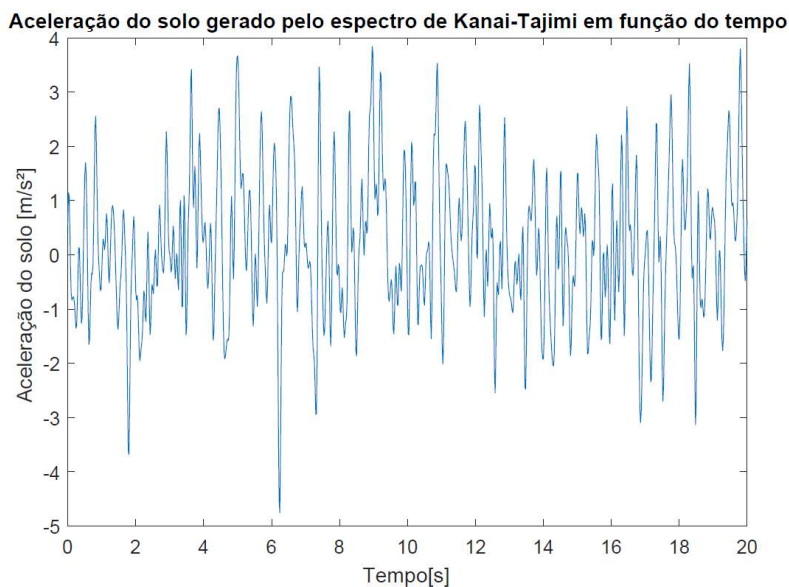


Figura 21 - Aceleração do solo em função do tempo.

Na Figura 22 é apresentado o gráfico do espectro do sinal de aceleração do solo gerado na Figura 21. Verifica-se que o pico no espectro ocorre próximo ao valor da frequência do solo, que é de  $18,0rad/s$ .

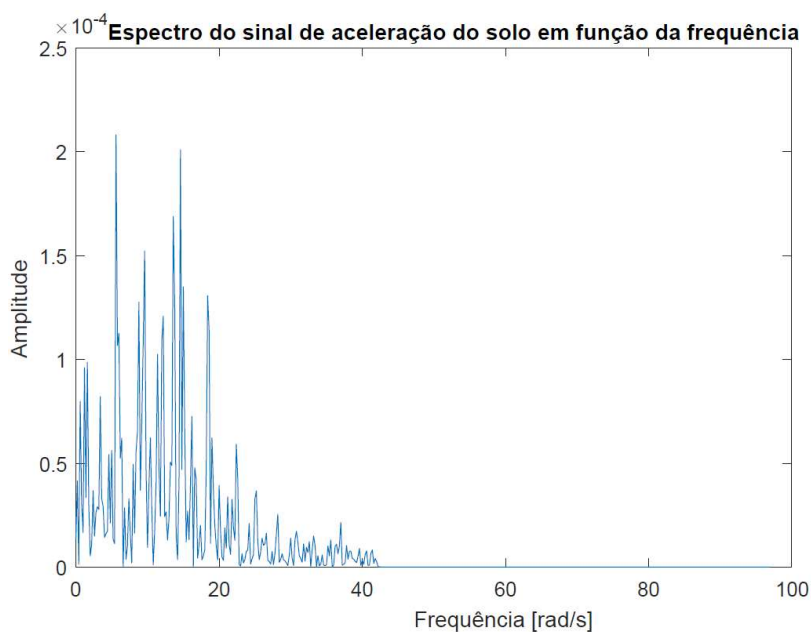


Figura 22 - Espectro do sinal de aceleração.

### 5.2.1 Resultados da Otimização Robusta – Determinação dos parâmetros com função objetivo *Drift*

Através das definições do algoritmo a adotar (*GWO - Grey Wolf Optimizer*), juntamente com os parâmetros de otimização, sendo: população *Search Agents* = 50 indivíduos, número de iterações *Max iteration* = 50, e 50 amostras, é feita a determinação dos parâmetros do(s) TMD's com a função objetivo *Drift* para cada um dos três cenários. Foram feitas 10 simulações para definição dos parâmetros ótimos dos TMD's para cada um dos cenários. Os resultados referentes ao cenário 1, 2 e 3 são apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18 respectivamente.

Tabela 16 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 1 - *Drift*

	Tempo (s)	E[ <i>Dmax</i> ] [m]	E[ <i>Dmax</i> ] [mm]
1	20928	0,010688	10,688
2	21145	0,0085836	8,584
3	20228	0,010197	10,197
4	20677	0,010364	10,364
5	20070	0,01129	11,290
6	20218	0,011593	11,593
7	20527	0,011451	11,451
8	21769	0,011044	11,044
9	20227	0,011466	11,466
10	21349	0,010981	10,981

Fonte Próprio Autor.

Verifica-se para o cenário 1 através dos resultados mostrados na Tabela 16, que a média do *Drift* é de 10,77mm, com um desvio padrão de 0,85mm e um coeficiente de variação de 7,9%.

Tabela 17 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 2 - *Drift*

	Tempo (s)	Nº TMD's	E[ <i>Dmax</i> ] [m]	E[ <i>Dmax</i> ] [mm]
1	17765	2	0,010135	10,135
2	17476	8	0,012339	12,339
3	17652	5	0,012254	12,254
4	17558	3	0,013317	13,317
5	17961	3	0,011885	11,885
6	18343	5	0,010684	10,684
7	19566	7	0,010341	10,341
8	17431	10	0,011529	11,529
9	17932	1	0,012153	12,153
10	18811	5	0,01315	13,150

Fonte Próprio Autor.

Para o cenário 2 verifica-se através dos resultados mostrados na Tabela 17 que a média do *Drift* é de 11,78mm, com um desvio padrão de 1,05mm e um coeficiente de variação de 8,9%. Já para o cenário 3, cujos resultados são listados na Tabela 18, pode-se observar que a média do *Drift* é de 12,43mm, com um desvio padrão de 1,39mm e um coeficiente de variação de 11,2%.

Tabela 18 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 - *Drift*

	Tempo (s)	Nº TMD's	E[ <i>Dmax</i> ] [m]	E[ <i>Dmax</i> ] [mm]
	18670	9	0,01054	10,540
	18062	3	0,013174	13,174
	18804	9	0,01054	10,540
	17691	10	0,014211	14,211
	18176	8	0,014144	14,144
	18110	9	0,010936	10,936
	17935	1	0,012494	12,494
	17406	1	0,011366	11,366
	16684	7	0,013769	13,769
	16651	9	0,013103	13,103

Fonte Próprio Autor.

Ao avaliar o tempo que cada um dos cenários necessitou para chegar ao resultado, verifica-se que o tempo médio para o cenário 1 foi de 5 horas e 45 minutos, enquanto que para o cenário 2 obteve-se uma média de 5 horas e 1 minuto e para o cenário 3 a média foi de 4 horas e 57 minutos.

Os parâmetros obtidos para os TMD/MTMD com a otimização para cada um dos cenários e simulações são apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21.

Tabela 19 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 1

Cenário	Posições $\vec{P}$	E [ $k_{TMD}$ ] [N/m]	E [ $C_{TMD}$ ] [Ns/m]	E [ $D_{max}$ ] [m]	E [ $D_{max}$ ] [mm]
		Estrutura sem TMD		3,6028E-02	36,03
1	[0000000001]	5220000	108544,98	1,0688E-02	10,69
1	[0000000001]	4486092,92	220126,28	8,5836E-03	8,58
1	[0000000001]	3480000	615180,89	1,0197E-02	10,20
1	[0000000001]	4013132,64	639608,54	1,0364E-02	10,36
1	[0000000001]	5220000	121869,22	1,1290E-02	11,29
1	[0000000001]	5220000	438906,58	1,1593E-02	11,59
1	[0000000001]	5220000	125340,96	1,1451E-02	11,45
1	[0000000001]	4292058,26	810215,21	1,1044E-02	11,04
1	[0000000001]	5213360,08	212027,13	1,1466E-02	11,47
1	[0000000001]	3603984,23	376065,17	1,0981E-02	10,98

Fonte Próprio Autor.

Tabela 20 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 2

Cenário	Posições $\vec{P}$	E [ $k_{TMD}$ ] [N/m]	E [ $C_{TMD}$ ] [Ns/m]	E [ $D_{max}$ ] [m]	E [ $D_{max}$ ] [mm]
		Estrutura sem TMD		3,6028E-02	36,03
2	[1100000000]	2390582,90; 2074970,66	677760,91; 13949,67	1,0135E-02	10,14
2	[0111111011]	435000; 435000; 435000; 652500; 652500; 652500; 442090,74; 435000	598654,06; 238338,84; 400056,92; 1000000; 107300,27; 289752,25; 131498,46; 1000000	1,2389E-02	12,39
2	[1010010101]	761755,20; 918998,58; 1044000; 1044000; 792747,52	851053,58; 954045,15; 10255,81; 1000000; 329750,37	1,2254E-02	12,25
2	[0010011000]	1513188,49; 1410005,28; 1472969,59	334930,55; 3764,70; 799298,76	1,3317E-02	13,32
2	[0100010010]	1467760,0,7; 1160000; 1395428	48593,14; 595682,61; 418356,48	1,1885E-02	11,89
2	[0011001110]	934777,02; 696000; 1044000; 696000; 954245,09	130109,20; 254169,83; 188862,52; 419120,20; 89931,46	1,0684E-02	10,68
2	[0011110111]	555844,1; 524718,52; 704350,42; 615573,72; 745714,29; 542160; 630804,02	688784,83; 591250,39; 377407,67; 338379,7; 45799,93; 792217,97; 157584,74	1,0341E-02	10,34
2	[1111111111]	522000; 348000; 470890,42; 348000; 348000; 348000; 348000; 414873,38; 348000; 359407,43	176180,06; 809103,34; 393052,27; 159415,85; 456877,66; 276919,34; 671734,68; 653305,51; 925519,20; 209493,71	1,1529E-02	11,53
2	[1000000000]	3480000	150598,09	1,2153E-02	12,15
2	[0010110110]	762410,09; 696000; 868598,49; 872712,06; 719139,21	699617,86; 282564,75; 775934,80; 31592,81; 307825,23	1,3150E-02	13,15

Fonte Próprio Autor.



Tabela 21 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3

Cenário	Posições $\vec{P}$	E [ $k_{TMD}$ ] [N/m]	E [ $C_{TMD}$ ] [Ns/m]	E [ $D_{max}$ ] [m]	E [ $D_{max}$ ] [mm]
		Estrutura sem TMD		3,6028E-02	36,03
3	[0111111111]	580000; 494229,92; 530702,37; 386666,67; 542842,57; 572670,21; 580000; 554016,5;	1000000; 1000; 267414,73; 572580,37; 566914,23; 83942,56; 459502,72; 670091,05;	1,0540E-02	10,54
3	[1010000100]	1634220,81; 1191011,38; 1160000	215665,43; 157402,09; 91005,20	1,3174E-02	13,17
3	[0111111111]	580000; 494229,92; 530702,37; 386666,67; 542842,57; 572670,21; 580000; 554016,50; 386666,67	1000000; 1000; 267414,73; 572580,37; 566914,23; 83942,56; 459502,72; 670091,05; 502488,48	1,0540E-02	10,54
3	[1111111111]	358990,32; 352634,83; 456693,73; 475082,30; 437775,40;	142450,90; 84827,36; 341541,33; 318948,67; 406249,93; 251775,94; 127070,98; 910303,29; 156441,14; 38672,97	1,4211E-02	14,21
3	[1110111110]	652500; 435000; 547860; 652500; 615327,94;	655545,59; 286441,86; 290808,79; 1000000; 1492,27; 66935,59;	1,4144E-02	14,14
3	[1100111101]	555204,98; 652500; 713357,86; 534081,89; 745714,29; 745714,29; 745714,29; 745714,29;	733787,44; 131156,62 74386,78; 899170,65; 25125,15; 995145,73; 4362,62; 501406,54;	1,0936E-02	10,94
3	[0000001000]	561298,05 4458280,19	202123,86 1000000	1,2494E-02	12,49
3	[0000010000]	4114235,29	275643,91	1,1366E-02	11,37
3	[0101111110]	578477,41; 578685,43; 745714,29; 745714,29; 680923,64; 613899,96; 606270,53	194971,54; 17289,22; 332876,77; 967219,73; 694762,84; 93175,53; 362336,89	1,3769E-02	13,77
3	[1011111111]	580000; 501772,20; 386666,67; 580000; 580000; 442341,29; 577288,52; 580000; 580000	56559,71; 1000000; 275412,87; 433071,04; 445641,39; 771147,18; 58028,81; 66942,56; 921872,87	1,3103E-02	13,10

Fonte Próprio Autor.

A estrutura sem sistema de controle de vibrações apresenta *Drift* de  $3,6028 \times 10^{-2}$  m, ou seja, 36,028 mm. Desta forma, na Tabela 22, são apresentados os resultados de cada uma das simulações quanto ao *Drift*, com os percentuais de redução, para os cenários 1, 2 e 3.

Tabela 22 – Comparativo redução *Drift* - Projeto Robusto de MTMD para os cenários 1, 2 e 3

Simulação	Estrutura sem controle [mm]	Estrutura com MTMD [m]					
		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Drift [mm]	Redução	Drift [mm]	Redução	Drift [mm]	Redução
1	36,03	10,69	70,33%	10,14	71,87%	10,54	70,74%
2	36,03	8,58	76,18%	12,34	65,75%	13,17	63,43%
3	36,03	10,20	71,70%	12,25	65,99%	10,54	70,74%
4	36,03	10,36	71,23%	13,32	63,04%	14,21	60,56%
5	36,03	11,29	68,66%	11,89	67,01%	14,14	60,74%
6	36,03	11,59	67,82%	10,68	70,35%	10,94	69,65%
7	36,03	11,45	68,22%	10,34	71,30%	12,49	65,32%
8	36,03	11,04	69,35%	11,53	68,00%	11,37	68,45%
9	36,03	11,47	68,17%	12,15	66,27%	13,77	61,78%
10	36,03	10,98	69,52%	13,15	63,50%	13,10	63,63%

Fonte Próprio Autor.

A média de redução para cada um dos cenários foi de 70,12% para o cenário 1, 67,31% para o cenário 2 e 65,51% para o cenário 3. Com isso conclui-se que os 3 cenários apresentam reduções significativas.

### 5.2.2 Resultados da Otimização Robusta – Determinação dos parâmetros com função objetivo Aceleração

Após a definição dos parâmetros do TMD/MTMD utilizando o *Drift* como função objetivo, esta foi alterada para Aceleração. Os parâmetros adotados para otimização foram mantidos os mesmos que com a função objetivo *Drift*, para os 3 cenários, ou seja, população *Search Agents* = 50 indivíduos, número de iterações *Max iteration* = 50, e 50 amostras. Assim como, com a função objetivo *Drift*, para a Aceleração foram realizadas 10 simulações com cada um dos 3 cenários. Os resultados referentes aos cenários 1, 2 e 3 são apresentados nas Tabelas 23, 24 e 25 respectivamente.

Verifica-se para o cenário 1, através dos resultados mostrados na Tabela 23, que a média da Aceleração foi de 5084mm/s<sup>2</sup>, com um desvio padrão de 399,15mm/s<sup>2</sup> e um coeficiente de variação de 7,85%.

Já para o cenário 2, verifica-se através dos resultados mostrados na Tabela 24, que a média de Aceleração foi de 5112mm/s<sup>2</sup>, com desvio padrão de 198,79mm/s<sup>2</sup> e coeficiente de variação de 3,89%.

Da mesma forma, para o cenário 3, cujos resultados são listados na Tabela 25, observa-se que a média de Aceleração foi de  $5565\text{mm/s}^2$  com desvio padrão de  $242,74\text{mm/s}^2$  e um coeficiente de variação de 4,36%.

Tabela 23 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 1 - Aceleração

	Tempo (s)	E[Amax] [m/s <sup>2</sup> ]	E[Amax] [mm/s <sup>2</sup> ]
1	19730	4,7628	4762,80
2	19542	5,1069	5106,90
3	20721	5,1521	5152,10
4	20649	5,6489	5648,90
5	19595	5,3423	5342,30
6	19479	4,4816	4481,60
7	21195	4,4422	4442,20
8	20844	5,1069	5106,90
9	19689	5,1521	5152,10
10	19542	5,6489	5648,90

Fonte Próprio Autor.

Tabela 24 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 2 - Aceleração

	Tempo (s)	Nº TMD's	E[Amax] [m/s <sup>2</sup> ]	E[Amax] [mm/s <sup>2</sup> ]
1	18124	1	5,2529	5252,90
2	17805	6	5,0329	5032,90
3	17525	8	5,3174	5317,40
4	17195	7	5,1703	5170,30
5	17077	1	5,5506	5550,60
6	17164	1	5,0297	5029,70
7	17682	9	4,9123	4912,30
8	17428	4	4,9195	4919,50
9	17358	6	5,0183	5018,30
10	17570	3	4,9155	4915,50

Fonte Próprio Autor.

Tabela 25 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 - Aceleração

	Tempo (s)	Nº TMD's	E[Amax] [m/s <sup>2</sup> ]	E[Amax] [mm/s <sup>2</sup> ]
1	17055	2	5,7773	5777,30
2	17356	6	5,6981	5698,10
3	16671	6	5,8763	5876,30
4	17386	5	5,5565	5556,50
5	17028	5	5,0867	5086,70
6	16981	2	5,6474	5647,40
7	16960	2	5,2153	5215,30
8	16732	8	5,8096	5809,60
9	16995	1	5,4682	5468,20
10	17913	5	5,5159	5515,90

Fonte Próprio Autor.

De forma análoga ao *Drift*, ao avaliar o tempo no qual cada um dos cenários necessitou para chegar ao resultado de Aceleração, verifica-se que o tempo médio para o cenário 1 foi de 5 horas e 35 minutos, enquanto que para o cenário 2 obteve-se uma média de 4 horas e 52 minutos e para o cenário 3 a média foi de 4 horas e 45 minutos.

Os parâmetros obtidos para os TMD/MTMD com a otimização para cada um dos cenários e simulações são apresentados nas Tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 26 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 1

Posições $\vec{p}$	E [ $k_{TMD}$ ] [N/m]	E [ $C_{TMD}$ ] [Ns/m]	E [Amax] [m/s <sup>2</sup> ]
	Estrutura sem TMD		13,44
[000000001]	5220000	155611,71	4,7628
[000000001]	4884541,85	582007,87	5,1069
[000000001]	4118088,55	1000000	5,1521
[000000001]	5220000	844627,96	5,6489
[000000001]	3746339,17	1000000	5,3423
[000000001]	5220000	176272,96	4,4816
[000000001]	4215496,28	272055,75	4,4422
[000000001]	4884541,85	582007,87	5,1069
[000000001]	4118088,55	1000000	5,1521
[000000001]	5220000	844627,96	5,6489

Fonte Próprio Autor.

Tabela 27 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 2

Posições $\vec{P}$	$E [k_{TMD}] [N/m]$	$E [C_{TMD}] [Ns/m]$	$E [A_{max}] [m/s^2]$
	Estrutura sem TMD		13,44
[000000010]	3905775,680	183078,370	5,2529
[1100011101]	607469,13; 580000; 580000; 669147,02; 648142,19; 580000	14186,38; 47127,70; 1353,14; 386658,66; 72119,34; 856676,04	5,0329
[1110111110]	652500; 652500; 435000; 435000; 567458,99; 435000; 652500; 435000	391360,48; 629280,63; 383312,47; 448025,08; 268941,14; 12024,75; 663474,35; 90150,20	5,3174
[1100111101]	745714,29; 497142,86; 697129,41; 497142,86; 745714,29; 497142,86; 555881,45	1798,78; 592566,55; 537750,35; 11459,89; 39745,26; 690705,22; 558248,88	5,1703
[0000001000]	5220000	1000000	5,5506
[0000010000]	3775340,43	127793,46	5,0297
[1101111111]	440865,02; 386666,67; 408328,58; 536234,17; 475061,54; 580000; 479681,92; 386666,67; 533689,29	8758,45; 103663,91; 561974,13; 852220,53; 449535,85; 432334,51; 485073,87; 317452,33; 560046,65	4,9123
[0010001110]	1218303,34; 1209976,71; 920449,23; 1010012,41	202737,21; 742093,02; 743014,97; 905016,16	4,9195
[0011110101]	580000; 799272,74; 724017,73; 610129,91; 580000; 580000	995830,05; 43433,77; 971326,83; 215262,74; 136228,79; 145345,47	5,0183
[1000001010]	1182412,59; 1241187,59; 1274760,77	186491,10; 288403,19; 203840,37	4,9155

Fonte Próprio Autor.

Tabela 28 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3

Posições $\vec{P}$	E [ $k_{TMD}$ ] [N/m]	E [ $C_{TMD}$ ] [Ns/m]	E [ $A_{max}$ ] [m/s <sup>2</sup> ]
	Estrutura sem TMD		13,44
[1100000000]	1804897,97; 1741103,10	631214,72; 278535,76	5,7773
[1110011010]	632083,12; 580000; 870000; 644474,83; 829397,95; 637538,69	28791,19; 55784,23; 300801,58; 706586,73; 757734,99; 357918,25	5,6981
[1011010011]	870000; 852940,02; 769787,90; 580000; 580000; 580000	1000000; 468235,37; 128336,38; 518892,26; 432404,37; 21489,53	5,8763
[1010011001]	696000; 713608,31; 1044000; 1044000; 984185,95	410165,56; 164553,67; 759397,61; 199589,55; 1000	5,5565
[1000001111]	723526,89; 878919,42; 910357,55; 1033416,89; 703029,70	695248,15; 136833,57; 722537,72; 766153,06; 995647,45	5,0867
[0010000001]	1740000; 2610000	790213,34; 261563,06	5,6474
[0000010001]	1869114,86; 1911790,77	148734,01; 276800,96	5,2153
[1011110111]	651284,85; 487297,69; 435000; 652500; 435000; 652500; 480686,5; 625599,97	287862,84; 132513,75; 302901,52; 1000; 59463,49; 113222,1; 105923,52; 785220,51	5,8096
[0001000000]	3640123,38	64113,92	5,4682
[1011100010]	854571,29; 1022257,65; 966209,69; 1028164,57; 794999,16	129329; 19539,65; 692801,24; 787017,34; 113596,94	5,5159

Fonte Próprio Autor.

A estrutura sem sistema de controle de vibrações apresenta Aceleração de 13,44m/s<sup>2</sup>. Desta forma, na Tabela 29, são apresentados os resultados de cada uma das simulações quanto à Aceleração, com os percentuais de redução, para os cenários 1, 2 e 3.

Tabela 29 – Comparativo redução Aceleração - Projeto Robusto de MTMD para os cenários 1, 2 e 3

Simulação	Estrutura sem controle [m/s <sup>2</sup> ]	Estrutura com MTMD [m/s <sup>2</sup> ]					
		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	Redução	Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	Redução	Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	Redução
1	13,44	4,7628	64,56%	5,2529	60,92%	5,7773	57,01%
2	13,44	5,1069	62,00%	5,0329	62,55%	5,6981	57,60%
3	13,44	5,1521	61,67%	5,3174	60,44%	5,8763	56,28%
4	13,44	5,6489	57,97%	5,1703	61,53%	5,5565	58,66%
5	13,44	5,3423	60,25%	5,5506	58,70%	5,0867	62,15%
6	13,44	4,4816	66,65%	5,0297	62,58%	5,6474	57,98%
7	13,44	4,4422	66,95%	4,9123	63,45%	5,2153	61,20%
8	13,44	5,1069	62,00%	4,9195	63,40%	5,8096	56,77%
9	13,44	5,1521	61,67%	5,0183	62,66%	5,4682	59,31%
10	13,44	5,6489	57,97%	4,9155	63,43%	5,5159	58,96%

Fonte Próprio Autor.

A média de redução para cada um dos cenários foi de 62,17% para o cenário 1, 61,96% para o cenário 2 e 58,59% para o cenário 3.

Na análise não foi levada em consideração a questão de comparativo e validação quanto as Normas de conforto para a aceleração, em virtude de estas estarem levando em consideração o vento como ação dinâmica excitando a estrutura. Para a ação dinâmica terremoto, não foram encontradas Normas pertinentes para conforto. Vale salientar que a questão do conforto, trata-se de uma verificação para um tempo maior de ocorrência, sendo que o terremoto tem a duração média de pico de 20 segundos. Desta forma, entende-se que com as simulações feitas e parâmetros obtidos para os TMDs garante-se uma redução considerável (entre 58 e 62%) na aceleração com a implantação dos TMDs quando comparado à estrutura sem sistema de controle.

### 5.2.3 Resultados da Otimização Robusta – Validação dos parâmetros com função objetivo *Drift* por sismos reais

Com o objetivo de validar a eficácia dos amortecedores obtidos pelas simulações, verifica-se esses como sistemas de controle de vibrações frente a excitações de sismos reais. No entanto, para a escolha dos sismos, de acordo com os critérios da Norma FEMA P-1050 descritos no item 4.9, verifica-se que o período de maior contribuição para a resposta inelástica

do edifício é o correspondente ao primeiro modo de vibração com período igual a 0,99 segundos, o qual corresponde a uma frequência de 1,01Hz e 6,346rad/s.

Em concordância com o critério da FEMA P-1050, a seleção dos terremotos deve ser feita através da utilização da mesma placa tectônica. Em virtude disto, atendendo a esta premissa, dentre tantas possibilidades, adotou-se a seleção de terremotos de duas placas tectônicas, sendo do Japão e da Califórnia. A escolha destas foi devido à incidência de uma maior ocorrência de terremotos com grandes magnitudes.

Os limites estipulados pela FEMA P-1050 devem ser seguidos de acordo com a seguinte faixa de períodos: Valores superiores no mínimo 2 vezes o período mais contributivo e nunca ficar abaixo de 1,5 vezes o período. Já para o limite inferior deve ser cerca de 0,9 vezes o período mais contributivo, mas nunca ser menor que 0,2 vezes este período. Desta forma os limites máximos referente ao período mais contributivo devem ser entre 0,2 e 2 vezes o período mais contributivo. No entanto, o recomendado é ficar entre 0,9 e 1,5 vezes este período.

Baseado no período mais contributivo para a estrutura (0,99 segundos), bem como, nos limites estipulados pela FEMA P-1050, tem-se como limite superior 2 vezes o período, o que nos remete a um período de 1,98 segundos, o qual corresponde a 0,505Hz e 3,17rad/s, além de este limite superior nunca ficar abaixo de uma vez e meia o período correspondendo a 1,485 segundos, 0,673Hz e 4,23rad/s. Porém para o limite inferior deve-se ter no mínimo 90% do primeiro modo, o que corresponde a 0,891 segundos, 1,12Hz e 2,245rad/s, assim como o limite inferior nunca deve ficar abaixo de 20% do período, ou seja, nunca menor que 0,198 segundos, 5,05Hz e 10,10rad/s. Através destes limites, tem-se então a faixa de valores permitidos para a validação da escolha dos terremotos reais a adotar, sendo  $0,891\text{segundos} \leq \text{Período} \leq 1,485\text{segundos}$ ;  $0,673\text{Hz} \leq \text{Frequência} \leq 1,12\text{Hz}$ ;  $4,23\text{rad/s} \leq \text{Frequência} \leq 7,05\text{rad/s}$ .

Na Tabela 30, são apresentados um total de 19 terremotos ocorridos na Placa Tectônica do Japão, com os respectivos períodos em segundos, frequência em Hz e frequência em rad/s. Assim como na Tabela 30, nas Tabelas 31 e 32 pode-se verificar um total de 70 terremotos ocorridos na Placa tectônica da Califórnia.



Tabela 30 – Terremotos Placa Tectônica Japão

Placa Tectônica Japão				
Quantidade	Terremoto	Período [s]	Frequência [rad/s]	Frequência [Hz]
1	Tsuruoka 18/06/2019	0,157	40,018	6,369
2	Near the East Coast of Honshu	0,313	20,056	3,192
3	Chitose 21/02/2019	1,158	5,426	0,864
4	44 km ESSE of Ishinomaki 25/10/2018	0,093	67,668	10,770
5	Hokkaido 5/9/2018	3,213	1,956	0,311
6	SSW of Takatsuki 17/6/2018	2,621	2,397	0,381
7	NNE of Oda 8/4/2018	0,457	13,739	2,187
8	East of Namie 25/2/2018	0,480	13,091	2,084
9	Near the East Coast of Honshu 30/12/17	0,483	13,000	2,069
10	Near the East Coast of Honshu 28/12/17	0,287	21,907	3,487
11	Ozu 18/4/2016	1,290	4,870	0,775
12	Takedamachi 15/4/2015	2,777	2,263	0,360
13	Ozu 15/4/2016	0,385	16,318	2,597
14	Kumamoto Shi Japan 15/4/2016	0,849	7,400	1,178
15	Uto 15/4/2016	1,218	5,158	0,821
16	Kumamoto Shi Japan 14/4/2016	0,629	9,990	1,590
17	Hokkaido 14/1/2016	0,908	6,922	1,102
18	Shikoku 26/4/2007	0,155	40,535	6,451
19	Ryukyu Islands 20/4/2007	0,233	26,960	4,291

Fonte Próprio Autor.

Na Tabela 30, é possível verificar que dentre os 19 terremotos, somente 4 atendem os critérios estipulados pela FEMA P-1050, os quais estão marcados na cor verde. Ao avaliar as Tabelas 31 e 32, verifica-se que dos 69 terremotos, 10 terremotos passam no critério da FEMA P-1050, marcados na cor verde.

Em virtude de ter sido feita a simulação do terremoto pelo método de Kanai Tajimi com o PGA de 0,475g, foram verificados o PGA para cada um dos terremotos listados nas Tabelas 30, 31 e 32. Para que a comparação e validação dos resultados em termos de *Drift* esteja na mesma base de PGA, quando utilizados os parâmetros ótimos dos amortecedores, foram realizadas as correções do PGA para cada um dos sinais dos terremotos antes da colocação como excitação na estrutura do edifício.

Tabela 31 – Terremotos Placa Tectônica Califórnia – Parte 1

Placa Tectônica Califórnia				
Quantidade	Terremoto	Período [s]	Frequência [rad/s]	Frequencia [Hz]
1	El Centro	0,461	13,640	2,171
2	La Habra Earthquake	0,217	29,011	4,617
3	South Napa Earthquake	1,916	3,279	0,522
4	Fendale Earthquake	1,138	5,522	0,879
5	Canyondam 24/05/2013	0,915	6,865	1,093
6	New Idria	0,939	6,692	1,065
7	Brawley	2,686	2,339	0,372
8	Westmorland	0,663	9,472	1,508
9	Calexico	1,251	5,024	0,800
10	Northern California (Weitehpee)	0,554	11,351	1,807
11	Borrego Springs	0,062	100,533	16,000
12	Ocotillo	2,207	2,847	0,453
13	Off the Coast of Northern California	0,688	9,127	1,453
14	Sierra El Mayor	3,121	2,013	0,320
15	Ferndale	4,122	1,524	0,243
16	Barstow	3,121	2,013	0,320
17	Chino Hills	2,114	2,972	0,473
18	Willow Creek	0,264	23,796	3,787
19	Cerro Prieto	0,771	8,149	1,297
20	Alum Rock	0,795	7,900	1,257
21	Trinidad, CA	1,553	4,046	0,644
22	Petrolia	0,583	10,776	1,715
23	Lafayette	0,996	6,308	1,004
24	Offshore Northern California	2,686	2,339	0,372
25	Greater Los Angeles	0,683	9,204	1,465
26	Anza	0,508	12,368	1,968
27	Mettler	0,334	18,830	2,997
28	Parkfield Aftershock	0,878	7,152	1,138
29	Keene	0,773	8,130	1,294
30	San Simeon	1,622	3,873	0,616
31	San Simeon	0,361	17,392	2,768
32	Humboldt Hill	1,638	3,835	0,610
33	Big Bear City	0,709	8,859	1,410
34	Yorba Linda	1,872	3,356	0,534
35	Bayview	2,621	2,397	0,381

Fonte Próprio Autor.

Tabela 32 – Terremotos Placa Tectônica Califórnia – Parte 2

Placa Tectônica Califórnia				
Quantidade	Terremoto	Período [s]	Frequência [rad/s]	Frequência [Hz]
36	Gilroy	0,204	30,756	4,895
37	Anza	0,608	10,335	1,645
38	Mohawk Valley	1,894	3,317	0,528
39	Big Bear Lake	2,244	2,800	0,446
40	Yountville	3,006	2,090	0,333
41	Hector Mine	2,643	2,378	0,378
42	Redding	0,167	37,736	6,006
43	San Juan Bautista	3,091	2,033	0,323
44	Northridge Aftershock	1,096	5,733	0,912
45	Northridge	2,341	2,684	0,427
46	Big Bear	0,501	12,540	1,996
47	Landers	1,170	5,369	0,854
48	Cape Mendocino / Petrolia	9,102	0,690	0,110
49	Petrolia	0,493	12,732	2,026
50	Sierra Madre	0,282	22,243	3,540
51	Loma Prieta	0,706	8,897	1,416
52	Superstition Hills	0,766	8,207	1,306
53	Elmore Ranch	5,285	1,189	0,189
54	Whittier Aftershock	0,248	25,311	4,028
55	Whittier Narrows	0,853	7,363	1,172
56	Chalfant Valley Aftershock	0,871	7,210	1,147
57	Chalfant Valley Foreshock	1,412	4,449	0,708
58	Redlands	2,601	2,416	0,385
59	Morgan Hill	4,428	1,419	0,226
60	Coalinga Aftershock	2,777	2,263	0,360
61	Coalinga	2,825	2,224	0,354
62	Mammoth Lakes	1,205	5,216	0,830
63	Westmorland	0,645	9,741	1,550
64	Livermore	0,427	14,726	2,344
65	Coyote Dam	1,463	4,295	0,684
66	Imperial Valley	3,413	1,841	0,293
67	Hollister	0,539	11,658	1,855
68	San Fernando	2,341	2,684	0,427
69	Port Hueneme	0,706	8,897	1,416

Fonte Próprio Autor.

São apresentados na Tabela 33 os valores de PGA em  $\text{cm/s}^2$ , PGA em g e períodos em segundos referente a placa Tectônica do Japão. Da mesma forma, na Tabela 34 são apresentados os terremotos da placa Tectônica Califórnia.

Tabela 33 – Terremotos Placa Tectônica Japão com PGA

Placa Tectônica Japão - com PGA			
Quantidade	Terremoto	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGA (g)
1	Tsuruoka 18/06/2019	633,340	0,646
2	Near the East Coast of Honshu	285,707	0,291
3	Chitose 21/02/2019	142,270	0,145
4	44 km ESSE of Ishinomaki 25/10/2018	227,264	0,232
5	Hokkaido 5/9/2018	388,460	0,396
6	SSW of Takatsuki 17/6/2018	521,390	0,532
7	NNE of Oda 8/4/2018	476,550	0,486
8	East of Namie 25/2/2018	87,650	0,089
9	Near the East Coast of Honshu 30/12/.	50,340	0,051
10	Near the East Coast of Honshu 28/12/.	96,950	0,099
11	Ozu 18/4/2016	195,730	0,200
12	Takedamachi 15/4/2015	183,250	0,187
13	Ozu 15/4/2016	223,100	0,227
14	Kumamoto Shi Japan 15/4/2016	827,200	0,843
15	Uto 15/4/2016	230,670	0,235
16	Kumamoto Shi Japan 14/4/2016	574,370	0,586
17	Hokkaido 14/1/2016	103,260	0,105
18	Shikoku 26/4/2007	117,390	0,120
19	Ryukyu Islands 20/4/2007	68,700	0,070

Fonte Próprio Autor.

Verifica-se através das Tabelas 33, 34 e 35, que os valores de PGA não estão iguais aos valores de 0,475g, sendo então realizadas normalizações para que estes fiquem com o PGA igual ao do simulado na obtenção dos parâmetros ótimos dos amortecedores. Vale salientar que a normalização do PGA não altera o conteúdo de frequência dos sismos, ou seja, altera apenas a amplitude.

Tabela 34 – Terremotos Placa Tectônica Califórnia com PGA Parte 1

Placa Tectônica Califórnia com PGA			
Quantidade	Terremoto	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGA (g)
1	El Centro	341,69	0,348
2	La Habra Earthquake	311,810	0,318
3	South Napa Earthquake	395,750	0,404
4	Fendale Earthquake	33,090	0,034
5	Canyondam 24/05/2013	375,230	0,383
6	New Idria	112,170	0,114
7	Brawley	157,900	0,161
8	Westmorland	236,230	0,241
9	Calexico	8,780	0,009
10	Northern California (Weitehpee)	77,280	0,079
11	Borrego Springs	82,640	0,084
12	Ocotillo	57,470	0,059
13	Off the Coast of Northern California	13,300	0,014
14	Sierra El Mayor	257,590	0,263
15	Ferndale	16,840	0,017
16	Barstow	19,700	0,020
17	Chino Hills	111,870	0,114
18	Willow Creek	39,960	0,041
19	Cerro Prieto	37,030	0,038
20	Alum Rock	219,010	0,223
21	Trinidad, CA	19,250	0,020
22	Petrolia	28,880	0,029
23	Lafayette	46,800	0,048
24	Offshore Northern California	14,700	0,015
25	Greater Los Angeles	159,570	0,163
26	Anza	200,000	0,204
27	Mettler	132,000	0,135
28	Parkfield Aftershock	29,900	0,030
29	Keene	24,400	0,025
30	San Simeon	122,100	0,125
31	San Simeon	953,700	0,972
32	Humboldt Hill	4,200	0,004
33	Big Bear City	186,100	0,190
34	Yorba Linda	27,670	0,028
35	Bayview	65,000	0,066

Fonte Próprio Autor.

Com base no que estipula a FEMA P-1050, tem-se para a placa tectônica do Japão a possibilidade de utilização de apenas 4 terremotos, conforme pode-se verificar na Tabela 30. Já para a placa tectônica da Califórnia, através das Tabelas 31 e 32, verifica-se a utilização de 10 terremotos. No entanto, conforme o ASCE 07-16 são necessários no mínimo 7 sinais de terremotos para a validação dos parâmetros dos sistemas de controle. Sendo assim, são adotados os 10 sinais referente a placa tectônica da Califórnia.

Tabela 35 – Terremotos Placa Tectônica Califórnia com PGA Parte 2

Placa Tectônica Califórnia com PGA			
Quantidade	Terremoto	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGA (g)
36	Gilroy	93,784	0,096
37	Anza	100,700	0,103
38	Mohawk Valley	20,580	0,021
39	Big Bear Lake	24,060	0,025
40	Yountville	498,100	0,508
41	Hector Mine	146,842	0,150
42	Redding	145,100	0,148
43	San Juan Bautista	94,700	0,097
44	Northridge Aftershock	684,600	0,698
45	Northridge	444,148	0,453
46	Big Bear	534,226	0,545
47	Landers	268,308	0,274
48	Cape Mendocino / Petrolia	134,544	0,137
49	Petrolia	369,707	0,377
50	Sierra Madre	270,633	0,276
51	Loma Prieta	617,695	0,630
52	Superstition Hills	294,490	0,300
53	Elmore Ranch	125,160	0,128
54	Whittier Aftershock	174,979	0,178
55	Whittier Narrows	254,080	0,259
56	Chalfant Valley Aftershock	63,671	0,065
57	Chalfant Valley Foreshock	227,372	0,232
58	Redlands	43,100	0,044
59	Morgan Hill	54,500	0,056
60	Coalinga Aftershock	23,300	0,024
61	Coalinga	282,207	0,288
62	Mammoth Lakes	83,862	0,086
63	Westmorland	465,633	0,475
64	Livermore	206,236	0,210
65	Coyote Dam	302,870	0,309
66	Imperial Valley	58,100	0,059
67	Hollister	89,170	0,091
68	San Fernando	249,965	0,255
69	Port Hueneme	163,637	0,167

Fonte Próprio Autor.

Na Tabela 36, verificam-se os dados referentes a cada um dos 10 terremotos da placa tectônica da Califórnia validados frente à FEMA P-1050. O valor de PGA apresentado refere-se ao valor original do terremoto, sendo o mesmo normalizado para 0,475g ~ 465cm/s<sup>2</sup>, onde se obtém os valores de *Drift* sem a utilização dos sistemas de controle de vibrações (*Drift* sem TMD). O tempo total bem como o intervalo de integração são parâmetros dos terremotos e foram os adotados para a obtenção dos resultados de *Drift* sem TMD.

Tabela 36 – Dados Terremotos Placa Tectônica Califórnia

Terremoto	Data Ocorrência	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	Período [s]	Tempo Total (s)	Δt (s)	Drift sem TMD [m]
Fendale Earthquake	10/03/2014	33,090	1,138	94,89	0,01	21,78
Canyondam	24/05/2013	375,230	0,915	77,64	0,01	9,94
New Idria	21/10/2012	112,170	0,939	300,92	0,02	47,20
Calexico	14/02/2012	8,780	1,251	86,72	0,01	11,46
Lafayette	02/03/2007	46,800	0,996	52,995	0,005	4,30
Northridge Aftershock	20/03/1994	684,600	1,096	96,275	0,005	13,70
Landers	28/06/1992	268,308	1,170	79,98	0,02	36,20
Chalfant Valley Foreshock	20/07/1986	227,372	1,412	39,98	0,02	16,03
Mammoth Lakes	07/01/1983	83,862	1,205	68,34	0,02	49,38
Coyote Dam	26/03/1978	302,870	1,463	20	0,02	22,98

Fonte Próprio Autor.

Com base na Tabela 36, verifica-se que dentre os 10 terremotos, somente 3 ficam acima do limite referente ao *Drift* que é de 30mm, demarcados na cor laranja, os quais demandam de sistema de controle de vibrações. Desta forma, os demais não necessitariam de controle.

Para a validação dos parâmetros ótimos dos amortecedores, são adotados como excitação os 3 terremotos: New Idria, Landers e Mammoth Lakes. Os resultados de *Drift* para cada um destes 3 terremotos, adotando os parâmetros ótimos dos amortecedores apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21, são mostrados por cenários 1, 2 e 3 através das Tabelas 37, 38 e 39, respectivamente.

Tabela 37 – *Drift* x Terremotos x Cenário 1

Terremoto - Drift [mm]		
New Idria	Landers	Mammoth Lakes
30,65	38,52	28,24
30,80	31,19	30,33
32,49	31,77	37,49
32,59	31,60	37,44
30,66	37,68	28,40
31,74	30,72	34,72
30,67	37,46	28,45
33,70	31,67	39,10
30,73	32,95	30,59
31,46	31,72	33,64

Fonte Próprio Autor.

Pode-se observar através da tabela 37 *Drift* x Terremotos x Cenário 1 – onde tem-se 1 TMD no topo da estrutura, que dentre as opções dos parâmetros ótimos obtidos na Tabela 19, submetidos aos 3 terremotos reais, somente em 3 parâmetros/simulações (1, 5 e 7) obtém-se êxito na redução do *Drift* de acordo com o limite de 30mm com o terremoto Mammoth Lakes.

No entanto, ao se avaliar os resultados de *Drift* constantes na Tabela 38 *Drift* x Terremotos x Cenário 2 – MTMD Distribuição horizontal, observa-se que os resultados quando os terremotos New Idria, Landers e Mammoth Lakes são adotados, tem-se 1 (4) de 10 configurações diferentes de parâmetros ótimos que satisfaz os resultados de *Drift*, ou seja, são menores que 30mm. No entanto, enquanto para o terremoto Landers, verifica-se que os parâmetros referente a simulação também satisfaz o critério adotado. Desta forma, tem-se 1 configuração de parâmetros que são capazes de reduzir os resultados de *Drift* frente aos 3 terremotos New Idria, Landers e Mammoth Lakes.

Tabela 38 – *Drift* x Terremotos x Cenário 2

Terremoto - Drift [mm]		
New Idria	Landers	Mammoth Lakes
31,16	36,64	31,43
33,71	31,32	39,79
34,33	39,70	38,72
28,54	29,99	27,76
32,61	31,87	35,35
32,32	31,05	38,16
36,42	35,09	42,55
30,72	29,70	35,23
30,94	32,59	30,87
34,17	32,26	39,40

Fonte Próprio Autor.

Os resultados de *Drift* x Terremotos x Cenário 3 – MTMD Distribuição vertical são mostrados na Tabela 39. Verifica-se que com os parâmetros ótimos dos amortecedores obtidos na Tabela 21, dentre os 3 terremotos, somente os parâmetros da simulação 7 das 10 atende ao *Drift* limite quando a estrutura é submetida ao terremoto Landers. Já para os terremotos New Idria e Mammoth Lakes nenhuma das 10 configurações dos parâmetros satisfazem ao critério de *Drift*.



Tabela 39 – *Drift* x Terremotos x Cenário 3

Terremoto - <i>Drift</i> [mm]		
New Idria	Landers	Mammoth Lakes
39,49	36,64	45,83
36,42	34,65	42,54
39,49	36,64	45,83
38,24	33,90	44,46
37,30	37,51	43,44
40,35	36,17	45,99
30,49	29,84	34,60
33,19	33,03	36,61
32,15	31,46	37,96
31,61	31,06	36,78

Fonte Próprio Autor.

Frente ao exposto com os 3 cenários e os 3 terremotos verifica-se que somente com o cenário 2 – Distribuição horizontal obtém-se uma configuração (4) que atende aos requisitos de *Drift* ao que estipula a Norma Colombiana quando a estrutura é excitada com os 3 terremotos – New Idria, Landers e Mammoth Lakes.

Já comparando os cenários 1 - Distribuição vertical e cenário 1 – 1 TMD no topo, ambos não possuem parâmetros/simulações distintos de TMD's que atendem aos 3 terremotos (New Idria, Landers e Mammoth Lakes) na totalidade. Frente ao exposto, como solução, a escolha se dá para utilização do cenário 2 - Distribuição horizontal, o qual atende ao limite estipulado pela Norma Colombiana.

É possível observar através da Figura 23 a resposta em termos de *Drift* do edifício antes e após a implantação da otimização robusta de MTMD em uma das simulações.

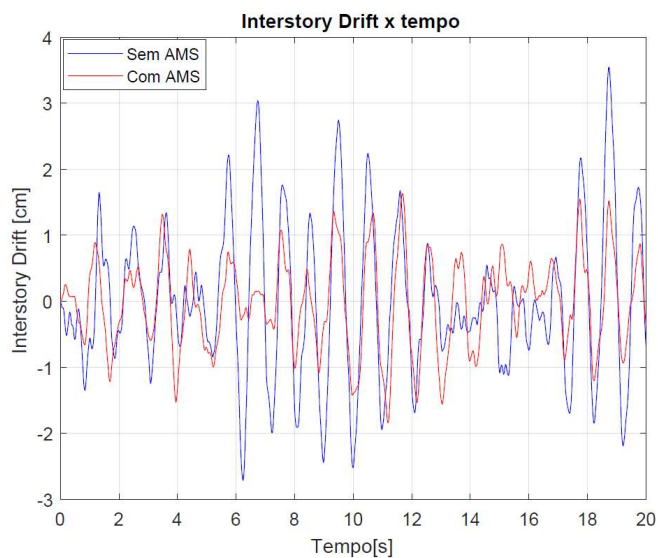


Figura 23 - *Drift* em função do tempo.

#### 5.2.4 Resultados da Otimização Robusta – Determinação dos parâmetros com função objetivo *Drift* – 1º Modo

Frente ao exposto nos resultados anteriores ao validar os parâmetros com terremotos reais, verifica-se a necessidade de validar a Otimização Robusta através da simulação dos parâmetros do's TMD's levando em consideração a excitação por Kanai Tajimi na frequência coincidente com a frequência do 1º modo de vibração da estrutura. Vale salientar de que os dados adotados para a geração dos parâmetros dos amortecedores seguem os mesmos adotados anteriormente, mudando somente a frequência da excitação que passa de 18 rad/s para 6,35 rad/s. Desta forma os valores médios e coeficientes de variação de cada parâmetro são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Valor médio e coeficiente de variação de cada variável aleatória de entrada.

<b>Variável Aleatória</b>	<b>Valor Médio</b>	<b>Coefficiente de Variação (%)</b>
Massa por andar	360t	5
Rigidez por andar	650MN/m	5
Amortecimento por andar	6.2MNs/m	25,9
Constante de rigidez para cada TMD	Variável de design	5
Constante de amortecimento para cada TMD	Variável de design	5
PGA	0,475g	10
$\omega_g$	6,35 rad/s	10
$\zeta_g$	0,6	10

Fonte Próprio Autor.

Demais informações referentes aos parâmetros são idênticas aos expostos nos itens 5.1.2; 5.1.3 e 5.1.4. Sendo que em virtude de o cenário 3 - Distribuição vertical ser o de maior dificuldade de estabilizar, ter a convergência, adota-se o cenário 3 para validação. Referente ao algoritmo adota-se o GWO - *Grey Wolf Optimizer* com 3 definições distintas para os parâmetros de otimização, sendo população *Search Agents* = (10, 30 ou 50) indivíduos, número de iterações *Max iteration* = (10, 30 ou 50). São consideradas (10, 30 ou 50) amostras, ou seja, (10, 30 ou 50) parâmetros diferentes para cada uma das variáveis aleatórias. Estas configurações são mostradas na Tabela 41:

Tabela 41 – Configurações dos parâmetros da otimização

<b>Número de Agentes</b>	<b>Número de Iterações</b>	<b>Número de Amostras</b>
10	10	10
30	30	30
50	50	50

Fonte Próprio Autor.

A otimização dos parâmetros dos TMDs com o cenário 3 gerou os resultados mostrados na Tabela 42, sendo as configurações de 10 agentes, 10 iterações e 10 amostras.

Tabela 42 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 *Drift* - 1º Modo

10.10.10

Cenário	Estrutura sem controle [m]	Estrutura com MTMD [m]	Redução
3	81,81	70,62	13,68%
3	81,81	67,34	17,69%
3	81,81	64,69	20,92%

Fonte Próprio Autor.

Na Tabela 43 são apresentados os parâmetros da otimização dos TMDs com o cenário 3 e as configurações de 10 agentes, 10 iterações e 10 amostras.

Tabela 43 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3 – *Drift* - 1º Modo 10.10.10

Posições $\vec{P}$	E [ $k_{TMD}$ ] [N/m]	E [ $C_{TMD}$ ] [Ns/m]	E [ $D_{max}$ ] [m]	E [ $D_{max}$ ] [mm]
	Estrutura sem TMD		8,1812E-02	81,81
[0001100101]	870000; 1023973,73; 870000; 909987,67	15496,37; 917702,24; 168064,83; 19938,37;	7,0618E-02	70,62
[1011011011]	667757,21; 497142,86; 516408,47; 745714,29; 497142,85; 732375,37; 497142,86	206878,37; 346017,79; 27197,89; 8468,63 1000; 34801,14; 645850,03	6,7337E-02	67,34
[1111111111]	580000; 386666,67; 580000; 448868,32; 580000; 386666,67; 491375,05; 524357,94; 399571,95	659891,11; 26790,22; 686535; 943484; 203036,86; 1000; 47794,98; 1000; 575867,87	6,4694E-02	64,69

Fonte Próprio Autor.

Verifica-se na Tabela 42 que com a configuração de 10 agentes, 10 iterações e 10 amostras tem-se uma redução nos resultados de *Drift* variando de 13 até 20 %, além de que através da Tabela 43 verifica-se o número de TMD's de 4, 7 e 9. Juntamente com os valores das tabelas 42 e 43, verificam-se as curvas de convergência para o cenário 3 com função objetivo *Drift* e 10 agentes, 10 amostras e 10 iterações de que não se tem a estabilidade do método. Salienta-se que o limite de *Drift* é 30mm, desta forma, os valores obtidos encontram-se acima deste limite.

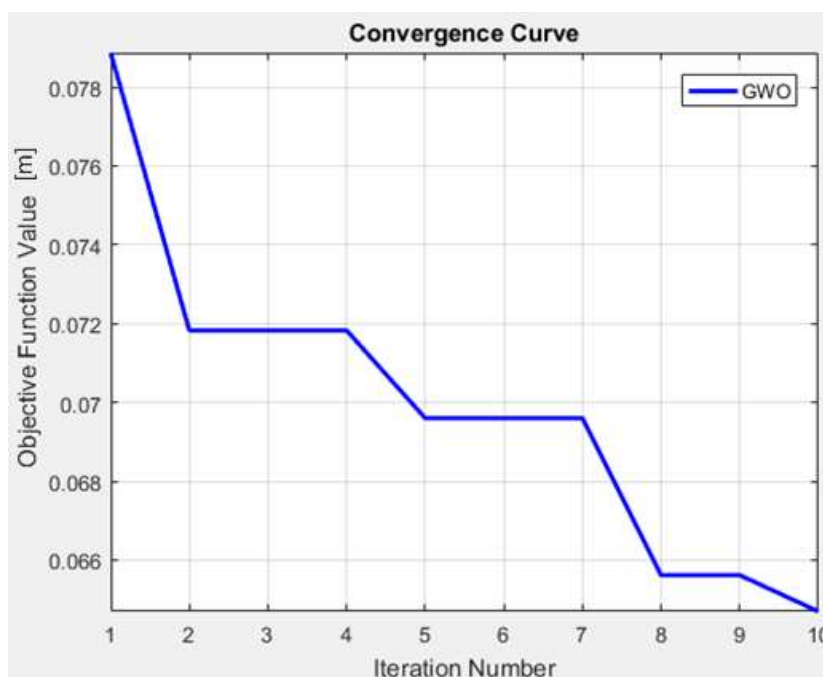


Figura 24 – Curvas de convergência cenário 3 *Drift* - 1º Modo 10.10.10.

Assim como nas Tabelas 42 e 43, nas Tabelas 44 e 45 são apresentados os resultados referentes aos parâmetros e reduções quando as configurações são de 30 agentes, 30 iterações e 30 amostras.

Tabela 44 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 *Drift* - 1º Modo 30.30.30

Cenário	Estrutura sem controle [m]	Estrutura com MTMD [m]	Redução
3	81,81	48,83	40,315%
3	81,81	51,21	37,412%
3	81,81	36,60	55,265%

Fonte Próprio Autor.

Verifica-se na Tabela 44 que com a configuração de 30 agentes, 30 iterações e 30 amostras tem-se uma redução nos resultados de *Drift* variando de 37 até 55 %, além de que através da Tabela 45 verifica-se o número de TMD's de 2, 5 e 7. Da mesma forma que para o caso anterior, o caso de 30 agentes, 30 amostras e 30 iterações as curvas de convergência mostradas na Figura 25 não são estáveis, bem como não atendem ao limite de 30mm.

Tabela 45 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3 – *Drift* - 1º Modo 30.30.30

Posições $\vec{P}$	E [ $k_{TMD}$ ] [N/m]	E [ $C_{TMD}$ ] [Ns/m]	E [ $D_{max}$ ] [m]	E [ $D_{max}$ ] [mm]
	Estrutura sem TMD		8,1812E-02	81,81
[0000001010]	1740000; 2482852,66	42640,53; 32102,76	4,3960E-02	43,96
[1110100100]	855486,43; 1043972,51;	1000000; 63372,05;	4,8830E-02	48,83
[1011011011]	605395,17; 700775,89;	848904,24; 566051,47;	5,1205E-02	51,21

Fonte Próprio Autor.

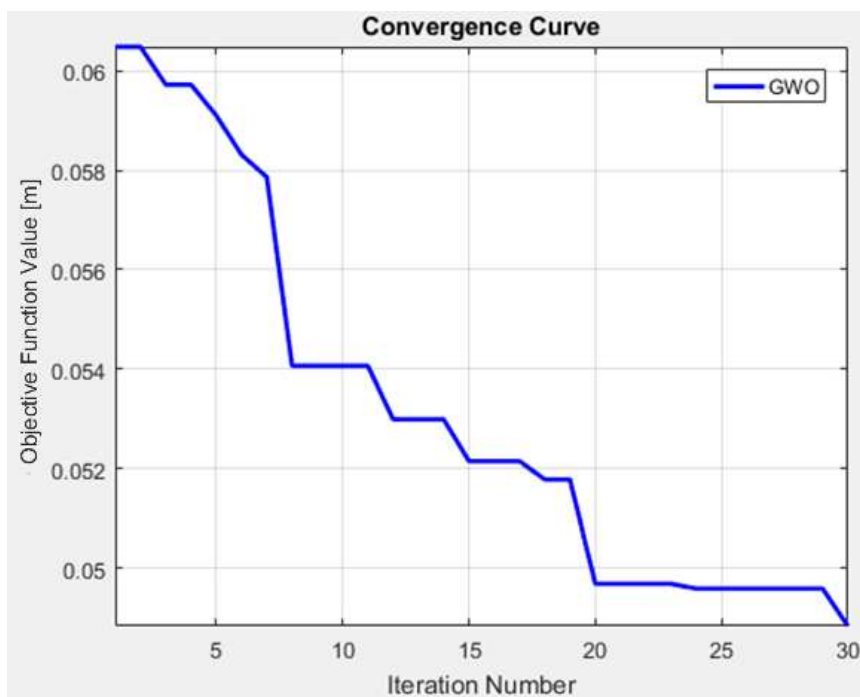


Figura 25 – Curvas de convergência cenário 3 *Drift* - 1º Modo 30.30.30.

Por último, nas Tabelas 46 e 47 são apresentados os resultados referentes aos parâmetros e reduções referente às configurações de 50 agentes, 50 iterações e 50 amostras.

Tabela 46 – Resultados do Projeto Robusto de MTMD para o cenário 3 *Drift* - 1º Modo

50.50.50

Cenário	Estrutura sem controle [m]	Estrutura com MTMD [m]	Redução
3	81,81	36,60	55,265%
3	81,81	31,88	61,036%
3	81,81	36,60	55,265%

Fonte Próprio Autor.

Verifica-se na Tabela 44 que com a configuração de 50 agentes, 50 iterações e 50 amostras tem-se uma redução nos resultados de *Drift* variando de 55 até 61 %, além de que através da Tabela 47 verifica-se o número de TMD's de 9, 9 e 9. Além de apresentar uma redução maior, esta configuração também apresenta um menor desvio padrão entre as 3 simulações. Se comprova na Figura 26, as quais as curvas de convergência mostram a estabilização a partir de aproximadamente a 32ª iteração. Verifica-se que o limite ainda não é atingido, no entanto, tem-se a estabilização das curvas de convergência, sendo os resultados bem próximos ao limite de 30mm.

Tabela 47 – Parâmetros Otimização TMD / MTMD - Cenário 3 – *Drift* - 1º Modo 50.50.50

Posições $\bar{P}$	E [ $k_{TMD}$ ] [N/m]	E [ $C_{TMD}$ ] [Ns/m]	E [ $D_{max}$ ] [m]	E [ $D_{max}$ ] [mm]
	Estrutura sem TMD		8,1812E-02	81,81
[1111011111]	580000; 523756,27; 571978,62; 386666,67; 477253,36; 451506,48; 386666,67; 422745,88; 386666,67	229282,45; 1000; 649066,86; 850086,39; 553630,5; 1000; 617413,18; 1000; 156614,44	3,6599E-02	36,60
[1111110111]	575718,98; 504255,88; 430994,72; 386666,67; 409952,56; 580000; 419005,35; 436501,07; 386666,67	131145,94; 5202,59; 164144,28; 10397,63; 987667,65; 621574,23; 2570,51; 1024,33; 139936,05	3,1877E-02	31,88
[1111011111]	580000; 523756.27; 571978.62; 386666,67; 477253.36; 451506.48; 386666.67; 422745.88; 386666.67	229282.45; 1000; 649066.86; 850086.39; 553630.5; 1000; 617413.18; 1000; 156614.44	3,6599E-02	36,60

Fonte Próprio Autor.

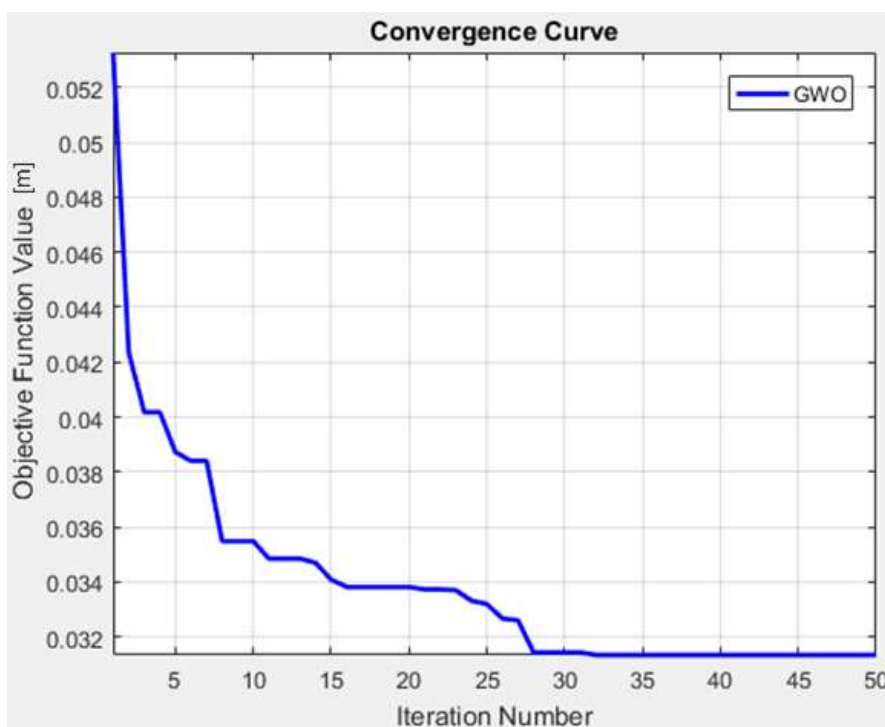


Figura 26 – Curvas de convergência cenário 3 *Drift* - 1º Modo 50.50.50.

### 5.2.5 Resultados da Otimização Robusta – Validação dos parâmetros com função objetivo *Drift* por sismos reais – 1º modo

Com o objetivo de validar a eficácia dos amortecedores obtidos pelas simulações, verificam-se esses como sistemas de controle de vibrações frente a excitações de sismos reais. Para tanto, adotam-se os mesmos 3 sismos validados de acordo com os critérios da Norma FEMA P-1050 descritos no item 4.9, onde o período de maior contribuição para a resposta inelástica do edifício corresponde ao primeiro modo de vibração com período igual a 0,99 segundos, o qual corresponde a uma frequência de 1,01Hz e 6,346rad/s. A placa tectônica adotada foi a Califórnia, assim como foi feito para a validação anterior.

Na Tabelas 48, 49 e 50, são apresentados os resultados referentes a cada uma das configurações para o número de agentes, número de iterações e número de amostras, entre 10, 30 e 50 respectivamente.



Tabela 48 – *Drift* x Terremotos x Cenário 3 - 1º Modo 10.10.10

Parâmetros / Simulação	Terremoto - Drift [mm]		
	New Idria	Landers	Mammoth Lakes
1	32,66	31,19	37,17
2	30,43	30,18	35,13
3	33,98	35,93	38,65

Fonte Próprio Autor.

Verifica-se através da Tabela 48 que com os parâmetros do algoritmo estipulados em 10 para cada, em nenhuma das configurações os parâmetros dos TMD's são capazes de atender aos limites que a Norma Colombiana preconiza, que para o caso é de 30 milímetros para os três terremotos New Idria, Landers e Mammoth Lakes.

Tabela 49 – *Drift* x Terremotos x Cenário 3 - 1º Modo 30.30.30

Parâmetros / Simulação	Terremoto - Drift [mm]		
	New Idria	Landers	Mammoth Lakes
1	45,36	38,80	45,72
2	44,61	35,89	46,15
3	28,62	27,43	30,35

Fonte Próprio Autor.

Na Tabela 49, cujas configurações de parâmetros do algoritmo foram estipuladas em 30 para cada uma das incógnitas, diferentemente ao exposto na Tabela 48, verifica-se que na terceira simulação obtém-se êxito com os parâmetros para controle da resposta em termos de *Drift* em dois terremotos New Idria e Landers. Vale salientar de que para o terremoto Mammoth Lakes, nenhuma das 3 simulações foi capaz de atender aos quesitos estipulados pela Norma Colombiana.

Ao efetuar as simulações com as configurações do algoritmo em 50 para cada uma das incógnitas, verifica-se através da tabela 50 que em todas as simulações, bem como, em todos os terremotos os parâmetros são capazes de satisfazer ao que preconiza a Norma Colombiana.

Tabela 50 – *Drift* x Terremotos x Cenário 3 - 1º Modo 50.50.50

Parâmetros / Simulação	Terremoto - <i>Drift</i> [mm]		
	New Idria	Landers	Mammoth Lakes
1	28,26	26,68	28,05
2	29,22	27,97	29,15
3	28,26	26,68	28,05

Fonte Próprio Autor.

Além de atender ao que preconiza a Norma Colombiana quando a estrutura é submetida aos terremotos reais, verifica-se que ele estabiliza em nove TMDs quando utiliza-se a configuração de 50 em cada um dos parâmetros do algoritmo, o que demonstra a robustez da ferramenta proposta. Diferentemente do que é exposto quando a configuração dos parâmetros dos TMDs está estipulada em 10 e 30 para cada. Vale salientar também a questão da estabilização da redução no *Drift* quando se tem as configurações do algoritmo em 50 comparado aos 10 e 30. Demonstrando mais uma vez a robustez da ferramenta proposta.

## 6 CONCLUSÕES

Atualmente já é bem conhecido e consolidado que o uso de dispositivos externos para dissipação de energia é efetivo para reduzir as amplitudes de vibração de sistemas submetidos a cargas dinâmicas. Entretanto, o uso otimizado destes dispositivos, determinando os seus parâmetros, posições e quantidade ótimos, é uma área que requer estudos adicionais. Apesar de alguns trabalhos de otimização de amortecedores serem encontrados na literatura recente, ainda há uma carência no desenvolvimento de métodos que permitam uma otimização robusta, levando em conta as incertezas presentes na estrutura, nos dispositivos de dissipação de energia e também na excitação.

Conforme exposto ao longo do desenvolvimento do trabalho, para resolver o problema da determinação dos melhores parâmetros para o(s) TMD(s), assim como, suas respectivas quantidades e posições, algoritmos de otimização são usados para minimizar uma função objetivo e encontrar uma solução ótima do problema. No entanto, sabe-se que, em um problema de engenharia, há um alto número de incertezas envolvidas. Isso leva a representar essas incertezas através de funções de distribuição de probabilidade e envolvê-las no processo de otimização. Assim, o processo de otimização torna-se mais complexo e é necessário implementar uma metodologia de otimização capaz de lidar com problemas dinâmicos que envolvam incertezas, que envolvam variáveis de projeto mistas, etc.

Neste contexto, esta tese apresentou uma metodologia completa para otimização robusta de parâmetros, número e posições de MTMD para controle de vibrações.

Para fins ilustrativos da metodologia proposta, realizou-se uma análise dinâmica de um edifício de 10 andares submetido a sismos aleatórios, considerando as incertezas presentes tanto na estrutura quanto nos sismos. A análise foi realizada antes e após a instalação dos MTMD otimizados de forma robusta, mostrando uma redução significativa nos máximos deslocamentos relativos entre andares.

Em relação ao algoritmo de otimização utilizado (GWO), pôde-se comprovar que este foi capaz de fornecer simultaneamente os valores ótimos dos parâmetros dos MTMD e suas respectivas posições na estrutura, para todos os 3 cenários analisados.

A função objetivo foi expressa em termos de minimização do valor esperado do *Drift*, assim como, em termos de máxima aceleração, porém, é interessante notar que a metodologia proposta é flexível e permite alterar esta função objetivo facilmente.

A eficácia da metodologia desenvolvida também foi comprovada quando os MTMD otimizados de forma robusta foram instalados na estrutura e esta foi submetida a sismos reais, mostrando que foi capaz de reduzir os deslocamentos relativos entre andares para valores aceitáveis quanto às normas consideradas. Já quando se compara a aceleração, conforme mencionado nos resultados, não se tem Normas pertinentes para o caso de terremotos, no entanto, as reduções foram relevantes (entre 58 e 62%) da aceleração sem sistema de controle de vibrações.

Vale salientar de que a análise é feita para atender ao limite de colapso da estrutura e não ao limite de conforto, visto que na ocorrência de terremotos se considera estado limite último e não estado de limite de serviço, desta forma não teremos conforto, mas sim a não ruptura das estruturas.

Verifica-se que quando a excitação não é coincidente ao primeiro modo de vibração, os parâmetros ótimos não são eficazes para atender ao que estipula a FEMA P-1050, vistos que os terremotos reais para garantia da eficácia do dimensionamento devem ser coincidentes com o primeiro modo, ou seja, a situação mais crítica para a estrutura. No entanto, ao otimizar os parâmetros dos TMDs com a excitação coincidente com o primeiro modo, os parâmetros são capazes de atender ao que preconiza os critérios da FEMA P-1050. Mostrando a robustez da ferramenta.

Desta forma, devido ao seu desempenho, a metodologia proposta pode ser recomendada como uma ferramenta eficaz para realizar o projeto ótimo de MTMD. Assim, este trabalho mostrou que o projeto de MTMD para o controle de vibração pode ser realizado de forma econômica e segura, reduzindo custos e otimizando os recursos.

Assim, como sugestão para trabalhos futuros, para comprovar novamente o potencial da metodologia de otimização robusta para MTMD, sugere-se aplicar a metodologia em outras estruturas como torres, pontes, passarelas, submetidas a diferentes tipos de cargas dinâmicas, como vento, veículos, excitação humana, por exemplo, novamente levando em consideração as incertezas presentes no sistema (estrutura, MTMD e excitação).

Outra sugestão para trabalhos futuros é avaliar o porquê por exemplo em uma das simulações não foi considerado TMD no “7º” andar, ou no “4º” andar, ou seja, porque da otimização não considerar em todos os andares, ou ainda somente no topo.

Como uma terceira sugestão para trabalhos futuros é avaliar se as cargas que estão no topo, ao otimizar o's TMD's estão indo para as colunas do edifício ou ainda como estão sendo dissipadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abé, M., Fujino, Y. **Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas.** In Earthquake engineering and structural dynamics, vol.23, pp. 813-835, 1994.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15421. Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento**, 2006.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações**, 1988.
- Almazán, J. L., Juan, C. L., Inaudiet, J. A. al. **A bidirectional and homogeneous tuned mass damper: A new device for passive control of vibrations.** In Engineering Structures vol. 29, no. 7, pp. 1548-1560, 2007.
- Arfiadi, Y., Hadi, M. N. S. **Optimum Placement and Properties of Tuned Mass Dampers Using Hybrid Genetic Algorithms.** In International Journal of Optimization in Civil Engineering, vol. 1, pp. 167–187, 2011.
- Bae J. S. Bae, J. S. Park, J. H. Hwang et al., **Vibration Suppression of a Cantilever Plate Using Magnetically Multimode Tuned Mass Dampers.** Shock and Vibration, vol. 2018, Article ID 3463528, 2018.
- Bandivadekar T.P., Jangid R. S. **Optimization of multiple tuned mass dampers for vibration control of system under external excitation.** Journal of Vibration and Control, 2013. doi:10.1177/1077546312449849.
- Barros R. C., et al. **Effects of Wind in Tall Buildings: a comparison for a real case and its vibration control using a Tuned Mass Damper.** Capítulo do livro Tall Buildings: Design Advances For Construction. Disponível em/: <<http://www.saxe->

[coburg.co.uk/pubs/future.htm](http://coburg.co.uk/pubs/future.htm).> UK: J. W. Bull. Saxe-Coburg Publications, 2013. ISBN 978-1-874672-25-8

Barros, R. C., Souza C.M. **Passive control by Pendulum TMD**. WSEAS Transactions on Systems, ISSN / E-ISSN: 1109-2777 / 2224-2678, Volume 16, 2017, Art. #2, pp. 9-18.

Battista, R. C. **Múltiplos Atenuadores Dinâmicos Sincronizados para controle das oscilações induzidas pelo vento na Ponte Rio-Niterói**. II seminário de patologia das edificações. Porto Alegre, Brasil, 2004.

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

Bekdaş, G; Nigdeli, S. M. **Metaheuristic based optimization of tuned mass dampers under earthquake excitation by considering soil-structure interaction**. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 92, p. 443-461, 2017.

BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

Borges, A. A. **Otimização de forma e paramétrica de estruturas treliçadas através dos métodos meta-heurísticos harmony search e firefly algorithm**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

Brito, L. A. Avaliação das principais fontes de vibração no meio urbano. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.14, n.4, p. 233-239, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400016>

Brzeski, P., Perlikowski, P., Kapitaniak, T. **Numerical Optimization of Tuned Mass Absorbers Attached to Strongly Nonlinear Duffing Oscillator**. In Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol. 19, Issue 1, pp. 298–310, 2014.

- Cabral, P. **Erros e Incertezas nas Medições**. Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2004.
- Cabral, S. V. S. **Uso de Osciladores Passivos Sintonizados no Controle de Vibrações de Estruturas Sujeitas a Excitações Aleatórias**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.
- Carneiro, R. B. **Controle Semi-Ativo de Vibrações Estruturais Utilizando Amortecedor Magnetorreológico**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2009.
- Civicioglu, P. **Backtracking Search Optimization Algorithm for numerical optimization problems**. Applied Mathematics and Computation. Vol 219, p. 8121 – 8144, 2013.
- Chaves, S. N. P. H. **Atenuação da resposta sísmica de estruturas de edifícios utilizando amortecedores viscosos**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2010.
- Chen, G., Wu, J. **Optimal Placement of Multiple Tuned Mass Dampers for Seismic Structures**. In Journal of Structural Engineering, vol. 127, pp. 1054–1062, 2001.
- Davenport A. G. **The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds**. Quart J Roy Meteorol Soc London, vol. 87, p. 194-211, 1961.
- Dehghan-Niri, E., Zahrai, S. M., Mohtat, A. **Effectiveness-Robustness Objectives in MTMD System Design: An Evolutionary Optimal Design Methodology**. In Structural Control and Health Monitoring, vol.17, pp. 218–236, 2010.
- Desu, N. B., Deb, S. K., Dutta, A. **Coupled Tuned Mass Dampers for Control of Coupled Vibrations in Asymmetric Buildings**. In Structural Control and Health Monitoring, vol.13, pp. 897–916, 2006.
- Dyke, S. J. **Acceleration Feedback Control Strategies for Active and Semi-Active Control Systems: Modeling, Algorithm Development, and Experimental Verification**. Tese de Doutorado, Graduate School of the University of Notre Dame, 1996.



- Dolce, M., Cardone, D., Ponzo, F.C. **Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems.** In *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 573–596, 2007.
- Douglas, J (2003-04-01). "Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates". *Earth-Science Reviews*. 61 (1–2): 43–104. Bibcode:2003ESRv...61...43D. doi:10.1016/S0012-8252(02)00112-5
- Elias, S., Matsagar, V. **Wind response control of tall buildings with a tuned mass damper.** In *Journal of Building Engineering*, vol. 15, pp. 51–60, 2018.
- Farghaly, A. A., Ahmed, M.S. **Optimum design of TMD System for tall buildings.** In *International Scholarly Research Network ISRN*, vol. 2012, Article ID 716469, 13 pages, 2012.
- Farshidianfar, A; Soheili, S. **Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil–structure interaction.** *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 92, p. 443-461, 2013.
- EUROCODE 1: **ACTIONS ON STRUCTURES – Part3: Action induced by cranes and machinery**, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, second draft, 2002.
- Farshi, B., Assadi, A. **Development of a Chaotic Nonlinear Tuned Mass Damper for Optimal Vibration Response.** In *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 16, Issue 11, pp. 4514–4523, 2011.
- FEMA P-1050 – NEHRP – National Earthquake Hazards Reduction Program. **FEMA P-1050-2: Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures.** Volume II Part 3. 2015.

- Ferreira, N.A.C. **Efeito do vento em edifícios altos – Aplicação a um caso concreto.** Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, Portugal, 2008.
- Filiatrault, A. **Performance evaluation of friction damped braced steel frames under simulated earthquake loads.** In Master Thesis, University of British Columbia, 221p., 1985.
- Frahm, H. **Device for damping of bodies.** In U.S. Patent No: 989, pp. 958, 1911.
- Ghosh, A., Basu, B. **A Closed-Form Optimal Tuning Criterion for TMD in Damped Structures.** In Structural Control and Health Monitoring, vol. 14, pp. 681–692, 2007.
- Gonçalves, M. S., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F. **Search group algorithm: a new metaheuristic method for the optimization of truss structures.** In Computers & Structures, vol. 153, pp. 165-184, 2015.
- Groehs, A. G., **Mecânica Vibratória,** In Editora Unisinos, 2001.
- Hadi, M. N. S., Arfiadi Y. Optimum design of absorber for MDOF structures. **J Struct Eng (ASCE)**, vol. 124, p. 1272-80, 1998.
- Hoang, N., Fujino, Y., Warnitchai, P. **Optimal Tuned Mass Damper for Seismic Applications and Practical Design Formulas.** In Engineering Structures, vol. 30, pp. 707–715, 2008.
- Hoang N, Warnitchai P. Design of multiple tuned mass dampers by using a numerical optimizer. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, vol. 34, p. 125-144, 2005.
- HOLMES, John D. **Wind Loading of Structures.** Taylor & Francis e-Library, 2004.

- Huntington, D. E., Lyrintzis, C. S. **Improvements to and limitations of Latin hypercube sampling**. In Probabilistic engineering mechanics, vol. 13, no. 4, pp. 245-253, 1998.
- Ikeda, Y. **Active and semi-active control of buildings in japan**. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 4(3), 2004.
- Iman, R. L. **Latin Hypercube Sampling Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment Google Scholar**, 2008.
- ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2372: Mechanical Vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for specifying evaluation standards**, 1974.
- Jaan, K. **Numerical Methods in Engineering with MatLab**. Ed. Cambridge, 2005.
- Jangid R. S. **Optimum multiple tuned mass dampers for base excited undamped systems**. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 28, p. 1041-1049, 1999.
- Joshi A. S., Jangid, R. S. **Optimum parameters of multiple tuned mass dampers for base-excited damped**. Journal of Sound and Vibration, vol. 202(5), p. 657-667, 1997.
- Kanai, K. **An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions**. In Bulletin Earthquake Research Institute, University of Tokyo, vol. 39, pp. 85-95, 1961.
- Kareem A., Klein, S. **Performance of multiple tuned mass dampers under random loadings**. ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 121(2), p. 348-361, 1995.
- Kobori, T. Past, Present and Future in Seismic Response Control in Civil Engineering Structures, **3rd World Conference on Structural Control**, vol.1, pp. 9-14, 2002

- Lago, F. S., Kripka, M., Salem, O., Pravia, Z. M. C. **Experimental and analytical study of vibration parameters in waffle concrete slabs.** In *Engineering Structures*, vol. 199, 2019.
- Lavan, O., Daniel, Y. **Full Resources Utilization Seismic Design of Irregular Structures Using Multiple Tuned Mass Dampers.** In *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 48, pp. 517–532, 2013.
- Lee, C. L., Chen, Y. T., Chung, L. L. et al., **Optimal Design Theories and Applications of Tuned Mass Dampers.** In *Engineering Structures*, vol. 28, pp. 43–53, 2006.
- Li, C., Qu, W. **Optimum Properties of Multiple Tuned Mass Dampers for Reduction of Translational and Torsional Response of Structures Subject to Ground Acceleration.** In *Engineering Structures* vol. 28, pp. 472–494, 2006.
- Li, C. **Optimum multi tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF.** *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 31, p. 897–898, 2002.
- Li, H. N., Ni, X.L. **Optimization of non-uniformly distributed multiple tuned mass dampers.** *Journal of Sound and Vibration*, vol. 308(3), p. 80–87, 2007.
- Luo, Y., Sun, H., Wang X. et al. **Wind Induced Vibration Control and Energy Harvesting of Electromagnetic Resonant Shunt Tuned Mass-Damper-Inerter for Building Structures.** *Shock and Vibration*, vol. 2017, Article ID 4180134, 2017.
- Marano, G. C., Greco, R., Chiaia, B. **A Comparison Between Different Optimization Criteria for Tuned Mass Dampers Design.** In *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, pp. 4880–4890, 2010.

- Marano, G. C., Sgobba, S., Greco, R., Mezzina, M. **Robust optimum design of tuned mass dampers devices in random vibrations mitigation.** Journal of Sound and Vibration, 313, p. 472-492, 2018.
- McKay, M. D., Beckman, R. J., Conover, W. J. **Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code.** In Technometrics, vol. 21, no. 2, pp. 239-245, 1979.
- Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F, Lopez, R. H. **Robust design optimization of friction dampers for structural response control.** In Structural Control and Health Monitoring, vol. 21, pp. 1240-1251, 2014.
- Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F, Lopez, R. H. **A firefly algorithm for the design of force and placement of friction dampers for control of man-induced vibrations in footbridges** In Optimization and Engineering, vol. 16, pp. 633-661, 2015.
- Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F, Lopez, R. H. **Simultaneous optimization of force and placement of friction dampers under seismic loading.** In Engineering Optimization, vol. 48, Issue 4, pp. 582-602, 2016.
- Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F, Lopez, R. H. **Failure probability minimization of buildings through passive friction dampers.** In The Structural Design of Tall and Special Buildings, vol. 25, Issue 17, pp. 869-885, 2016.
- Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F, Lopez, R. H. **Methodology for the simultaneous optimization of location and parameters of friction dampers in the frequency domain.** In Engineering Optimization, vol. 50, Issue 12, pp. 2108-2122, 2018. doi: 10.1080/0305215X.2018.1428318
- Miguel, L. F. F., Riera, J. D. **Controle De Vibrações De Estruturas Utilizando Amortecedores Por Atrito.** In Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, vol. 8, no. 1, 2008.

- Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F. **Discussion of paper: “Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search.** [Eng. Struct. vol. 33, Issue 9, pp. 2716–2723, 2011]. In *Engineering Structures*, vol. 54, pp. 262-264, 2013.
- Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F., Torii, A. J. **A novel approach to the optimum design of MTMDs under seismic excitations.** In *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 23, pp. 1290-1313, 2016. DOI 10.1002/stc.1845
- Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F. **Multimodal size, shape, and topology optimization of truss structures using the Firefly algorithm.** In *Advances in Engineering Software*, vol. 56, pp. 23-37, 2013.
- Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., Torii, A. J. et al. **Robust design optimization of TMDs in vehicle bridge coupled vibration problems.** In *Engineering Structures*, vol. 126, pp. 703-711, 2016.
- Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. **Shape and size optimization of truss structures considering dynamic constraints through modern metaheuristic algorithms.** In *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 9458-9467, 2012.
- Min, K. W., Seong, J. Y., Kim, J. **Simple Design Procedure of a Friction Damper for Reducing Seismic Responses of A Single-Story Structure.** In *Engineering Structures* 32: 3539–3547, 2010.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis, A. **Grey Wolf Optimizer.** *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Mohebbi, M., Shakeri, K., Ghanbarpour, Y. et al., **Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (gas) for mitigating the seismic response of structures** In *Journal of Vibration and Control*, vol. 19, n. 4, pp. 605-625, 2013.

- Mohtat, A., Niri, E. D. **Generalized framework for robust design of tuned mass damper systems.** Journal of Sound and Vibration, vol. 330, pp. 902–922, 2011.
- Mondal, J., Nimmala, H., Abdulla, S. et al., **Tuned liquid damper.** In Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics Prague, Czech Republic, no.68, 2014.
- Moutinho, C. M. R. **Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil.** Tese, Universidade do Porto, Portugal, 2007.
- Nagahama, C. V. **Análise Numérica e Modelagem Computacional de um Sistema Estrutural com controle semiativo de vibração tipo amortecedor magnetorreológico.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Juíz de Fora: UFJF/MMC,2013.
- Newland, D. E. **An introduction to random vibrations and spectral analysis.** Nova York, Logman, 1987.
- Nise, N. S. **Control Systems Engineering.** John Wiley & Sons, Inc, 3<sup>a</sup> edição, 2000.
- Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. **A New Assessment in the Simultaneous Optimization of Friction Dampers in Plane and Spatial Civil Structures.** In MATHEMATICAL PROBLEMS IN ENGINEERING, vol. 2017, pp. 1-18, 2017.
- Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. **Optimization of location and forces of friction dampers.** In REM-International Engineering Journal, vol. 70, no. 3, pp. 273-279, 2017.

Ospina, C. S. **Otimização de amortecedores de massa sintonizados, múltiplos e interligados, para o controle de vibrações em edifícios altos.** Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2008.

Paredes, M. M. **Utilização de amortecedores de massas sintonizadas no controle de vibrações em estruturas.** Dissertação, Universidade do Porto, Portugal, 2008

Paredes, M.M., R.C. Barros. **On the Use of TMDs for Regular Buildings and Bridges under Dynamic Actions.** The Second International Symposium on Computational Mechanics (ISCM II) in conjunction with The Twelfth International Conference on the Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC XII), Hong-Kong and Macao, 30<sup>th</sup> Nov-3<sup>rd</sup> Dec 2009. (Published in the book (ISCM II and EPMESC XII) Proceedings of the Second International Symposium on Computational Mechanics and the Twelfth International Conference on the Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science, ISBN: 978-0-7354-0778-7, ISSN: 0094-243X; Editors: Jane WZ Lu, Andrew YT Leung, Vai Pan Iu, Kai Meng Mok; Part Two, pp. 1624-1629, American Institute of Physics (AIP), AIP Conference Proceedings 1233, Melville, New York, 2010. <http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.3452154;jsessionid=8pi20b1rfb9p7.x-aip-live-03>

Qu, W. L., Chen, Z. H., Xu, Y. L. **Dynamic Analysis of Wind-Excited Truss Tower with Friction Dampers.** In Computers and Structures, vol.79, pp. 2817–2831, 2001.

RASID, S. M. R. et al. **Design and control of active vibration isolation system with an active dynamic vibration absorber operating as accelerometer.** Journal of Sound and Vibration, v. 438, p. 175-190, 2019.

Rao, S. S. **Mechanical Vibrations.** Prentice Hall, 1995.

Rodrigues, R. M. R. **Geração de acelerogramas sísmicos artificiais compatíveis com um espectro de resposta.** Monografia, Escola Politécnica da UFRJ, 2012.



- Sadek, F, Mohraz, B., Taylor, A. W. et al., **A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications**. In Earthq Eng Struct Dyn, vol. 26, Issue 6, pp.617-635, 1997.
- Sánchez, W. E. D., Avila, S.M., Brito, J. L. V. et al. **Optimal placement of damping devices in buildings**. In Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, pp.40-337, 2018.
- Seyedali Mirjalili a , b , \*, Andrew Lewis a. **The Whale Optimization Algorithm**. In Elsevier - Advances in Engineering Software 95 (2016) 51–67.
- Shinozuka, M., Jan C. M., **Digital simulation of random process and its applications**. J. Sound Vib., vol. 25, p.111-8, 1972.
- Soong T. T., Dargush, G. F. **Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering**, John Wiley & Sons, Chichester, NY, 1997.
- Soto, M. G., Adeli, H. **Tuned mass Dampers**. In Arch Comput Methods Eng, vol. 20, pp. 419–431, 2013.
- Sousa, C. M. A. **Controlo de respostas dinâmicas em estruturas através de TMDs pendulares**. Dissertação, Universidade do Porto, Portugal, 2013.
- Spencer Jr., B.; Nagarajaiah, S. **State of the Art of Structural Control**. Journal of Structural Engineering, ASCE, Volume 129, pp. 845-856, 2003
- Srinivasulu, P., Vaidyanathan, C. V. **Handbook of Machine Foundations**. New Delhi, Índia, 1976.

- Tajimi, H. **A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake.** In Proceedings of 2nd World Conference in Earthquake Engineering, pp. 781-797, 1960.
- Vellar, L. S., Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. **Robust Optimum Design of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in Buildings Subjected to Seismic Excitation.** In Hindawi - Shock and Vibration, vol 2019, Article ID 9273714, 9 pages. doi.org/10.1155/2019/9273714.
- Vellar, L. S., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. **Controle de vibrações de estruturas através do uso de amortecedor de massa sintonizado (AMS).** In XXXVII Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, p. 1168-1182, 2016.
- Vellar, L. S., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. **Estimativa de razão de massas ideal de amortecedor de massa sintonizada para controle de vibrações em estruturas.** Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering-Cilamce, 2016.
- Vellar, L. S., Miguel, L. F. F., Miguel, L. F. F. **Optimization of parameters for tuned mass damper.** Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones-ENIEF, p. 1553-1564, 2016.
- Vellar, L. **Otimização de amortecedores de massa sintonizados em estruturas submetidas a um processo estacionário.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: UFRGS, 2017.
- Villaverde, R., Newmark, N. M. **Seismic Response of Light Attachments to Buildings.** University of Illinois, Urbana, 1980.
- Villaverde, R. Reduction in seismic response with heavily-damped vibration absorbers. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, Vol. 13, p. 33-42, 1985.**

- Villaverde, R. Earthquake response of systems with nonproportional damping by the conventional response spectrum method. **Proc. 7th world conference on earthquake engineering. Istanbul**, Vol. 5, p. 467-474, 1980.
- Wang, J. F., Lin, C. C., Lian, C. H. **Two-Stage Optimum Design of Tuned Mass Dampers with Consideration of Stroke**. In Structural Control and Health Monitoring, vol. 16, pp. 55–72, 2009.
- Warburton, G. B. **Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters**. Earthquake engineering and structural dynamics, vol.10, p. 381-401, 1982.
- Warnitchai, P., Hoang, N. **Optimal Placement and Tuning of Multiple Tuned Mass Dampers for Suppressing Multi-Mode Structural Response**. In Smart Structures and Systems, vol.2, Issue 1, pp. 1–24, 2006.
- Wu, Q., Zhao X, He, S. et al. **A Bufferable Tuned-Mass Damper of an Offshore Platform against Stroke and Response Delay Problems under Earthquake Load**. Shock and Vibration, vol. 2016, Article ID 9702152, 2016.
- Wu, Q., Zhao, X, Zheng, R. et al. **High Response Performance of a Tuned-Mass Damper for Vibration Suppression of Offshore Platform under Earthquake Loads**. Shock and Vibration, vol. 2016, Article ID7383679, 2016.
- Wu, Q., Zhao, W., Zhu W. et al. **A Tuned Mass Damper with Nonlinear Magnetic Force for Vibration Suppression with Wide Frequency Range of Offshore Platform under Earthquake loads**. Shock and Vibration, vol. 2018, Article ID 1505061, 2018.
- Wyss, G. D., Jorgensen, K. H. **A user's guide to LHS: Sandia's Latin hypercube sampling software**. SAND98-0210, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1998.

- Xu, K., Igusa, T. **Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies.** Earthquake Engineering & Structural Dynamics, vol. 21, Issue 12, pp. 1059–1070, 1992.
- Xu, Z. D., Zhao, H. T., Li, A. Q. **Optimal analysis and experimental study on structures with viscoelastic dampers.** In Journal of Sound and Vibration, vol. 273, Issue 3, pp. 607–618, 2004.
- Xu, Z. D. **Earthquake mitigation study on viscoelastic dampers for reinforced concrete structure.** In Journal of Vibration and Control, vol. 13. Issue 1, pp. 29–45, 2007.
- 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.
- Zuo, L., Nayfeh, S.A. **Optimization of the Individual Stiffness and Damping Parameters in Multiple Tuned-Mass-Damper Systems.** In Journal of Vibration and Acoustics, vol. 127, pp. 77-83, 2005.