

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL PARA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES ESTRUTURAIS UTILIZANDO UM AMORTECEDOR MAGNETORREOLÓGICO

APPLICATION OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE TECHNIQUES FOR ATTENUATION OF STRUCTURAL VIBRATIONS USING A MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER

Catarina V. Nagahama^a, Flávio S. Barbosa^a, Leonardo G. Fonseca^a e Raphael O.
Oliveira^b

^aPrograma de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora,
Campus Universitário, Bairro Martelos, Juiz de Fora, MG, CEP 36036-330, Brasil,
catarina.nagahama@engenharia.ufjf.br, flavio.barbosa@engenharia.ufjf.br,
leonardo.goliatt@ufjf.edu.br, <http://www.ufjf.br/pgmcl/>

^bFaculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Universitário, Bairro
Martelos, Juiz de Fora, MG, CEP 36036-330, Brasil, ote.raphael@engenharia.ufjf.br

Palavras-chave: Amortecedores magnetorreológicos, sistemas de controle semi-ativo, inteligência computacional.

Resumo. Sistemas estruturais estão frequentemente sujeitos a excitações que podem provocar vibrações indesejáveis e em diversos casos é necessária a utilização de dispositivos auxiliares de controle. Neste contexto será abordado o amortecedor do tipo magnetorreológico, que consiste em um sistema de controle semi-ativo com diversas aplicações práticas. Porém, esses amortecedores apresentam um comportamento tipicamente não-linear, o que dificulta a sua modelagem. Suas forças de controle não são controladas de maneira direta. Para induzir esses dispositivos a desenvolverem forças de controle próximas às forças ótimas, visando a redução de vibrações da estrutura, é necessário adotar estratégias de seleção de voltagem de controle adequadas à não-linearidade desses sistemas. Assim, este trabalho apresentará a aplicação de algumas técnicas de inteligência computacional para a escolha da voltagem de controle, otimizando assim o funcionamento desses amortecedores.

Keywords: Magnetorheological dampers, semi-active control systems, computational intelligence.

Abstract. Structural systems are often subject to excitations that can cause undesirable vibrations and in many cases it is necessary to use auxiliary control devices. In this context it will be approached the magnetorheological damper, which consists of a semi-active control system with several practical applications. However, these dampers have a typically non-linear behavior, which makes their modeling difficult. Their control forces are not directly controlled. In order to induce optimal control forces, aiming the reduction of structural vibrations, it is necessary to adopt appropriated control voltage selection due to the nonlinearity of these systems. So, this work will present the application of some computational intelligence techniques to choose the control voltage, thus optimizing the operation of these dampers.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas estruturais estão frequentemente sujeitos a excitações externas ou internas que podem provocar vibrações indesejáveis. Os efeitos das vibrações estruturais são os mais variados: de uma forma geral causam nos seres humanos sensações desagradáveis como desconforto e perda de produtividade, enquanto nos elementos estruturais, acentuam a fadiga e o desgaste, reduzindo a vida útil e aumentando o risco de colapso. Por estes motivos, em diversos casos é necessária a utilização de dispositivos auxiliares de controle.

São inúmeras as áreas nas quais o problema de controle de vibrações tem uma especial importância, como por exemplo: área de veículos terrestres, aéreos, marítimos e submarinos; engenharia civil; acústica; medicina; máquinas industriais; indústria de eletroeletrônicos, entre outras (Zambrano, 2013).

Os sistemas de controle são usualmente classificados em ativo, passivo, híbrido e semiativo. Os sistemas passivos são caracterizados por não necessitarem de fontes externas de energia para funcionarem, enquanto os ativos dependem de um suprimento externo de energia, sendo usualmente mais eficientes na proteção de estruturas contra carregamentos dinâmicos com componentes aleatórias, pois são capazes de compensar possíveis perturbações ou distúrbios na força de excitação, enquanto os passivos tendem a perder eficiência durante a ocorrência de excitações fora da faixa de frequência para a qual foram projetados. Os sistemas híbridos combinam as propriedades e vantagens dos dois sistemas de controle, possuindo simultaneamente dissipadores de energia (componentes passivos) e atuadores (ativos). Já os sistemas de controle semiativos atuam de maneira diferente, pois podem modificar as propriedades mecânicas do sistema controlador mediante a injeção de pequenas quantidades de energia, conseguindo operar com fontes de energias portáteis, como baterias (Carneiro, 2009). Possuem, portanto, a adaptabilidade dos dispositivos de controle ativo sem necessitar de tamanhas fontes de suprimento de energia.

Neste contexto, será abordado o funcionamento de um dispositivo de controle do tipo semiativo: o amortecedor magnetorreológico - AMR. Esses amortecedores apresentam um comportamento tipicamente não-linear, o que dificulta a sua modelagem. As forças de controle dos amortecedores magnetorreológicos não são controladas de maneira direta. Para induzir esses dispositivos a desenvolverem forças de controle próximas às forças ótimas, visando a redução de vibrações da estrutura, é necessário adotar estratégias de seleção de voltagem de controle adequadas a não-linearidade desses sistemas. Assim, neste trabalho será apresentada a aplicação de duas técnicas de inteligência computacional, “*Random Forest Regressor*” e “*Gradient Boosting Regressor*”, utilizadas na tentativa de aperfeiçoar o funcionamento desses amortecedores.

O modelo estrutural, o modelo do amortecedor e a excitação imposta à estrutura foram os mesmos utilizados nos trabalhos de Carneiro (2009), Valencia (2011) e Nagahama (2013). Pretende-se, assim, avaliar a eficiência das estratégias de seleção de voltagem de controle empregadas neste trabalho através da comparação com os resultados já publicados nos trabalhos supracitados.

2 SISTEMA ESTRUTURAL DINÂMICO

A equação diferencial que descreve a resposta de um sistema estrutural dinâmico controlado é dada por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{f}_E(t) + \mathbf{f}_C(t), \quad (1)$$

onde t é o tempo; $\mathbf{q}(t)$ é a resposta do sistema em termos de deslocamentos; $\ddot{\mathbf{q}}(t) = \frac{d^2}{dt^2}\mathbf{q}(t)$; $\dot{\mathbf{q}}(t) = \frac{d}{dt}\mathbf{q}(t)$; \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são respectivamente as matrizes de massa, de amortecimento e de

rigidez do sistema; $\mathbf{f}_E(t)$ é a resultante das forças de excitação; e $\mathbf{f}_C(t)$ é a resultante das forças de controle.

3 EQUAÇÕES DE ESTADO DO SISTEMA

A Eq. (1) pode ser apresentada na forma de espaço de estados, da seguinte forma:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (2)$$

onde

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{q}(t) \\ \dot{\mathbf{q}}(t) \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}(t) \\ \ddot{\mathbf{q}}(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}; \quad e$$

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}_E(t) + \mathbf{f}_C(t).$$

4 SISTEMA DE CONTROLE SEMIATIVO

O controle semiativo é uma solução alternativa aos sistemas passivo e ativo, e tem recebido muita atenção nos últimos anos por oferecer a adaptabilidade do controle ativo sem demandar grandes fontes de suprimento de energia (Dyke, 1996), sendo esta sua principal característica.

Os dispositivos semiativos não são capazes de adicionar energia mecânica ao sistema controlado. As forças de controle são calculadas com base em medidas de amplitudes de respostas da estrutura, que necessita ser sensoriada. Porém, essas forças de controle não são aplicadas por atuadores, como no caso ativo, mas através da modificação, em tempo real e de acordo com uma regra pré-selecionada de decisão, das características mecânicas desses dispositivos (ASCE, 2000). As propriedades de amortecimento e rigidez dos sistemas semiativos, podem, então, ser variadas dinamicamente, gerando de maneira indireta as forças de controle, a fim de reduzir de maneira ótima as respostas do sistema estrutural. Por esse motivo, o controle semiativo, diferentemente do controle ativo, não tem potencial para desestabilizar uma estrutura (Dyke, 1996).

Os sistemas semiativos podem ser vistos como dispositivos passivos controláveis, pois, apesar de poderem modificar suas propriedades de amortecimento e/ou rigidez, os dispositivos semiativos agem passivamente na estrutura (Carneiro, 2009).

Assim, esse tipo de controle combina a confiabilidade dos sistemas passivos e a capacidade de adaptação dos sistemas ativos, sem exigir grande quantidade de energia, o que o torna solução bastante atraente para o controle de vibrações.

São vários os dispositivos semiativos encontrados na literatura. Os mais comuns são: amortecedores de orifício variável, dispositivos de controle com rigidez variável, amortecedores de atrito variável, amortecedores de massa sintonizados semiativos, amortecedores sintonizados com coluna de líquido ajustável e amortecedores de fluidos controláveis, como os fluidos magnetorreológicos.

Os fluidos magnetorreológicos possuem a capacidade de mudar, reversivelmente, seu comportamento reológico, modificando sua consistência do estado líquido ao semi-sólido por meio da aplicação de um campo magnético em um intervalo de tempo de poucos milissegundos. Por serem objeto de estudo do presente trabalho, os amortecedores magnetorreológicos serão apresentados de maneira mais detalhada na próxima seção.

5 AMORTECEDORES MAGNETORREOLÓGICOS – AMR

Os AMR são geralmente constituídos por um cilindro com um pistão, dentro do qual se encontra o fluido magnetorreológico. Sobre a superfície lateral do cilindro são dispostas bobinas nas quais circula uma corrente elétrica que corresponde à criação de um campo

magnético.

As principais características dos AMR segundo Valencia (2011) são: na maioria das vezes são operados com pequenas fontes de energia; possuem altos níveis de tensão de escoamento; apresentam desempenho estável em um amplo intervalo de temperatura; podem exercer forças de controle altas; e o tempo de resposta é de poucos milissegundos.

Essas propriedades fazem dos AMR uma ferramenta ideal para o controle de sistemas estruturais, pois com eles é possível administrar forças de amortecimento de forma simples, rápida e segura, a um custo relativamente baixo. Sua capacidade de adaptação é ideal para o projeto de sistemas de controle semiativo, pois, mesmo em configuração passiva, ou seja, sob a aplicação de voltagem constante ou na ausência de voltagem, os AMR continuam sendo dispositivos dissipadores de energia.

5.1 Modelo dos amortecedores magnetorreológicos

Os amortecedores magnetorreológicos apresentam um comportamento tipicamente não-linear, histerético e de difícil modelagem. Spencer Jr. et al. (1997) apresentaram uma revisão de diversos modelos para amortecedores de fluidos controláveis e propuseram um novo modelo para este tipo de dispositivo que previu seus comportamentos satisfatoriamente: o modelo Bouc-Wen modificado, apresentado na Figura 1 e utilizado neste trabalho.

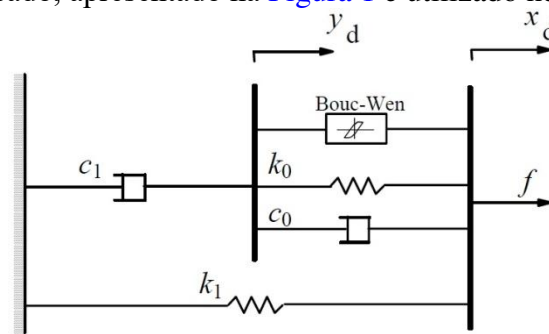


Figura 1: Modelo de Bouc-Wen modificado - Adaptado de Spencer Jr. et al. (1997).

O modelo de Bouc-Wen modificado é governado pela Eq. (3):

$$f = \alpha\zeta + c_0(\dot{x}_d - \dot{y}_d) + k_0(x_d - y_d) + k_1(x_d - x_0), \quad (3)$$

onde f representa a força total gerada pelo sistema, c_0 é o coeficiente de amortecimento viscoso observado em altas velocidades, k_0 controla a rigidez a grandes velocidades, k_1 é a rigidez do acumulador, x_d e y_d são os deslocamentos do amortecedor, x_0 é o deslocamento inicial da mola com rigidez k_1 associado à presença do acumulador, e ζ é uma variável auxiliar governada pela Eq. (4):

$$\dot{\zeta} = -\gamma|\dot{x}_d - \dot{y}_d|\zeta|\zeta|^{n-1} - \beta(\dot{x}_d - \dot{y}_d)|\zeta|^n + A(\dot{x}_d - \dot{y}_d), \quad (4)$$

na qual a velocidade \dot{y}_d é dada pela Eq. (5):

$$\dot{y}_d = \frac{1}{(c_0 - c_1)}[\alpha\zeta + c_0\dot{x}_d + k_0(x_d - y_d)], \quad (5)$$

sendo c_1 o amortecimento viscoso observado em baixas velocidades, α uma variável auxiliar e n , γ , β e A constantes que retratam a histerese e o efeito *roll-off* da curva força-velocidade.

5.2 Estratégias de controle

As forças de controle dos amortecedores magnetorreológicos não são controladas de

maneira direta. Para induzir esses dispositivos a desenvolver forças de controle próximas às forças ótimas, visando a redução de vibrações da estrutura, é necessário adotar estratégias adequadas de seleção de voltagem do controle. O controle semiativo realizado pelo emprego de AMR é um problema essencialmente não-linear devido às propriedades não-lineares desse tipo de dispositivo discutidas nesta seção. Por esse motivo, o projeto desse tipo de controle requer a adoção de uma estratégia de seleção do sinal de comando adequada à não-linearidade do amortecedor.

Podemos citar como estratégias de controle não-lineares algoritmos do tipo: controle *bang-bang*, controle *clipped optimal*, controle *bi-state*, métodos de controle *fuzzy* e controle adaptativo não-linear (Carneiro, 2009). Neste trabalho pretende-se testar duas técnicas de inteligência computacional, “*Random Forest Regressor*” e “*Gradient Boosting Regressor*”, para otimizar a voltagem aplicada nos amortecedores magnetorreológicos a fim de melhorar o desempenho do controlador.

A seguir será apresentada e detalhada toda a metodologia adotada neste trabalho.

6 MODELAGEM COMPUTACIONAL

6.1 Estrutura

A estrutura cujas respostas dinâmicas pretende-se atenuar consiste no modelo estrutural empregado nos trabalhos de Carneiro (2009) e Nagahama (2013). Trata-se de um protótipo experimental em escala 2:3 de um edifício de dois andares construído no Laboratório do Departamento de Estruturas, Geotecnia e Geologia Aplicada situado na Universidade da Basilicata, Itália (ver Figura 2). A escolha desse modelo estrutural foi feita com o objetivo de validar os resultados encontrados neste trabalho através da comparação com os resultados já publicados nos trabalhos supracitados. A modelagem adotada para a estrutura foi a mesma utilizada nos referidos trabalhos.

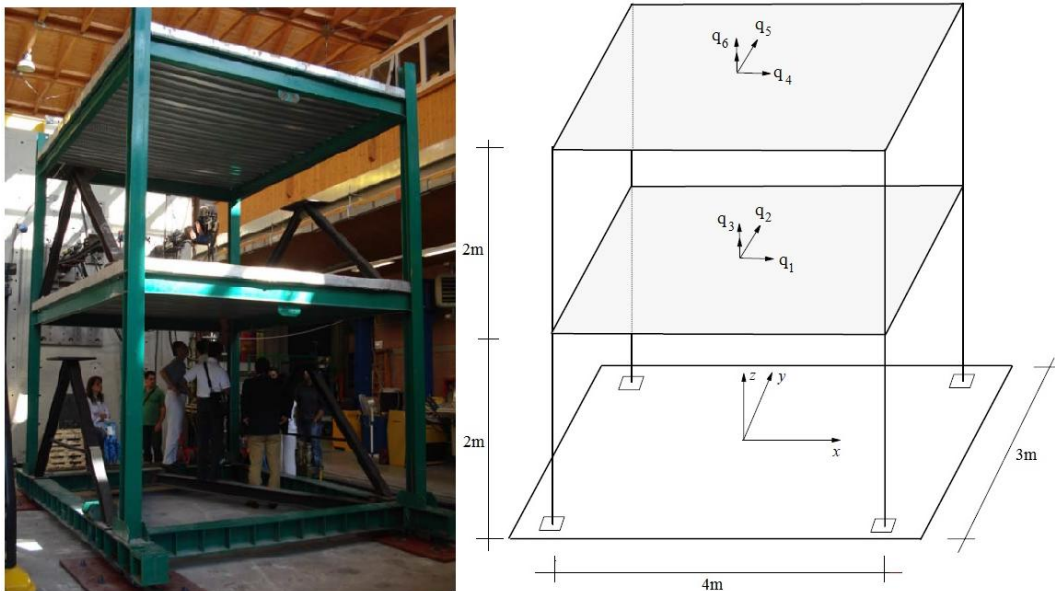


Figura 2: Modelo experimental e numérico do pórtico tridimensional.

A massa do pórtico foi idealizada concentrada no centro de massa das lajes, sendo a matriz de massa representada por meio de uma matriz diagonal com os elementos associados às translações (q_1 , q_2 , q_4 e q_5) expressos em unidades de kg e os elementos associados à rotação (q_3 e q_6), em unidades de $kg \cdot m^2$. A matriz de amortecimento \mathbf{C} da estrutura foi adotada como

sendo uma proporção de 10% matriz de massa, o que corresponde a uma razão de amortecimento de 0,2% com relação à primeira frequência da estrutura. Sendo assim, a matriz \mathbf{C} é dada por: $\mathbf{C} = 0,1 \times \mathbf{M}$.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2660 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2660 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7600 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2660 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2660 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7170 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 266 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 266 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 760 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 266 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 266 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 717 \end{bmatrix}.$$

A matriz de rigidez \mathbf{K} da estrutura analisada foi determinada com base na hipótese do diafragma com os elementos associados aos deslocamentos expressos em unidades de N/m e os elementos associados à rotação, em unidades de $N\cdot m$:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 28888000 & 0 & 0 & -11596000 & 0 & 0 \\ 0 & 12303000 & 0 & 0 & -5550000 & 0 \\ 0 & 0 & 114379000 & 0 & 0 & -48376000 \\ -11596000 & 0 & 0 & 7621000 & 0 & 0 \\ 0 & -5550000 & 0 & 0 & 4524000 & 0 \\ 0 & 0 & -48376000 & 0 & 0 & 35330000 \end{bmatrix}.$$

6.2 Carregamento

Assim como no trabalho de Carneiro (2009) e Nagahama (2013), a estrutura foi submetida à aceleração \ddot{x}_g (Figura 3) na base, impondo uma força de excitação \mathbf{f}_E dada pela Eq. (6), sendo $\mathbf{r} = \text{diag}[1,0,0,1,0,0]$.

$$\mathbf{f}_E(t) = \mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{x}_g(t), \quad (6)$$

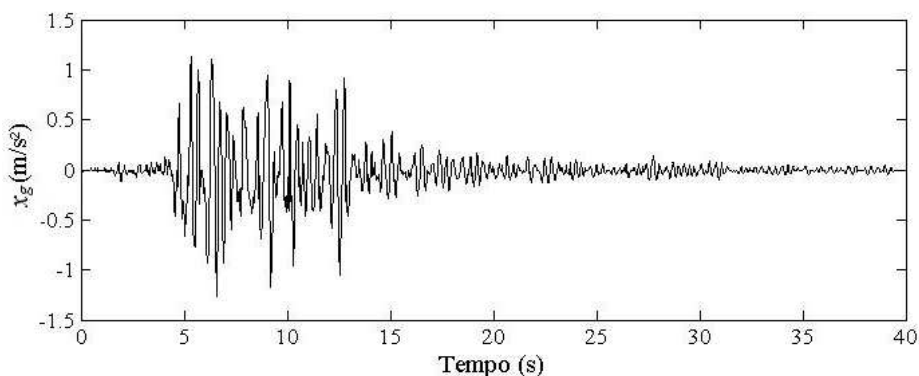


Figura 3: Vetor aceleração \ddot{x}_g .

6.3 Amortecedor magnetorreológico

Para atenuar a magnitude das respostas dinâmicas da estrutura, foram instalados entre a base e o primeiro andar, dois AMR. Trata-se do mesmo dispositivo utilizado nos trabalhos de Carneiro (2009) e Nagahama (2013): amortecedor magnetorreológico comercialmente

disponível e fabricado pela empresa Lord Corporation cuja descrição é MR RD-1005-3.

Basili (2006) identificou experimentalmente os parâmetros que caracterizam o comportamento desse amortecedor. Dois desses parâmetros permaneceram constantes sob diversas condições de operação, não dependendo do valor da voltagem aplicada, são eles: $k_0 = 2020 \text{ N/m}$ e $n = 2$. A força no acumulador $k_1(x_d - x_0)$ foi estipulada em 60 N . Já os parâmetros A , β e γ , assumiram valores fixos sugeridos na literatura (Spencer Jr. et al., 1997): $A = 20000 \text{ m}$, $\beta = 10000 \text{ m}$ e $\gamma = 10000 \text{ m}$. Basili (2006) identificou também, que os parâmetros c_0 , c_1 e α do amortecedor variam em função da voltagem (v) aplicada e são expressos pelas Eq. (7), (8) e (9) respectivamente:

$$c_0 = (-1,25v^2 + 4,15v + 1,62) \times 10^3 \text{ (Ns/m)}; \quad (7)$$

$$c_1 = (11,53v^2 + 37,68v + 11,87) \times 10^3 \text{ (Ns/m)}; \text{ e} \quad (8)$$

$$\alpha = (58v^2 + 112v + 51) \text{ (N)}. \quad (9)$$

6.4 Controle semiativo utilizando “Random Forest Regressor” e “Gradient Boosting Regressor”

Por serem dispositivos altamente não lineares, as forças de controle geradas pelos AMRs não podem ser controladas de maneira direta.

Primeiramente, calcula-se a força de controle ótima do sistema por meio de uma técnica conhecida na literatura como LQR, *linear quadratic regulator* (Meirovitch, 1990).

Sabe-se que uma alteração na voltagem aplicada aos AMRs representa modificações em algumas propriedades dos amortecedores, que influenciam no cálculo da força de controle. Para induzir esses amortecedores a desenvolver forças próximas às forças de controle ótimas, a voltagem aplicada a estes dispositivos deve ser selecionada de maneira cuidadosa. Neste trabalho foram utilizadas como estratégias duas técnicas de inteligência computacional, “Random Forest Regressor” e “Gradient Boosting Regressor”. Essas ferramentas estão disponíveis no *software* livre *Python* e de forma simplificada funcionam da seguinte maneira:

- *Radom Forest Regressor*: é um meta estimador que se ajusta a várias árvores de decisão de classificação em várias subamostras do conjunto de dados e usa a média para melhorar a precisão preditiva e controlar o ajuste excessivo (Breiman, 2001).
- *Gradient Boosting Regressor*: permite a otimização de funções de perda arbitrariamente diferenciáveis. Em cada estágio, uma árvore de regressão é ajustada no gradiente negativo da função de perda (Friedman, 2001).

Para o treino dessas técnicas foi criada uma amostra de dados por meio da simulação do funcionamento do AMR com a imposição de um deslocamento senoidal com frequência de 5π e amplitude máxima de 53mm , compatível com o modelo do AMR, e a aplicação de voltagens aleatórias variando de 0 V a $2,5 \text{ V}$, sendo este o valor adotado neste trabalho como a voltagem máxima a ser aplicada ao amortecedor. Desta forma foram obtidas diversas combinações de valores de deslocamento, velocidade e voltagem, que foram utilizadas para o cálculo das respectivas forças de controle do AMR (f_{AMR}).

Os dados para o teste foram obtidos através da simulação da estrutura de pórtico submetida ao carregamento já descrito e ao controle ótimo (LQR). Assim foram obtidos os dados de deslocamento e velocidade da estrutura e calculadas as forças de controle ótimo ($f_{ótima}$) almejadas, restando como incógnita as voltagens a serem aplicadas ao AMR para que o mesmo seja capaz de gerar forças de controle próximas às forças ótimas.

Aplicando as técnicas aos dados de treino e teste supracitados, foram obtidos como dados

de saída as voltagens a serem aplicadas ao AMR. É sabido que se trata de uma aproximação, visto que os vetores de voltagem foram obtidos considerando as respostas da estrutura em termos de deslocamento e velocidades obtidas utilizando o controle ótimo, o que significa considerar $f_{AMR} = f_{ótima}$. Trata-se de uma aproximação razoável, pois $f_{AMR} \cong f_{ótima}$.

Os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

7 RESULTADOS E AVALIAÇÕES

Serão apresentados nesta seção os resultados das simulações utilizando os modelos e os algoritmos de controle semiativo utilizando “*Random Forest Regressor*” e “*Gradient Boosting Regressor*”. Estes novos resultados serão comparados aos obtidos por Nagahama (2013) utilizando as técnicas *clipped optimal* (Carneiro,2009) e *clipped optimal* modificado nas configurações 1 e 2, e também aos resultados do controle ótimo LQR.

As Figuras 4 e 5 exibem, respectivamente, os deslocamentos ao longo do tempo para o grau de liberdade horizontal do primeiro andar (q_1) e do segundo andar da estrutura (q_2) sem controle e com os controles semiativos utilizando as estratégias “*Random Forest Regressor*” e “*Gradient Boosting Regressor*”.

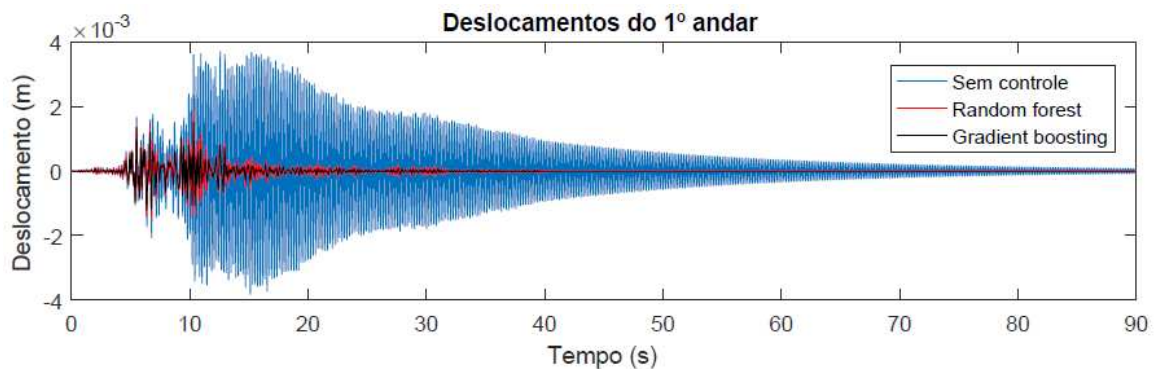


Figura 4: Deslocamentos horizontais do primeiro andar da estrutura (q_1) sem controle e com controle passivo utilizando “*Random Forest Regressor*” e “*Gradient Boosting Regressor*”.

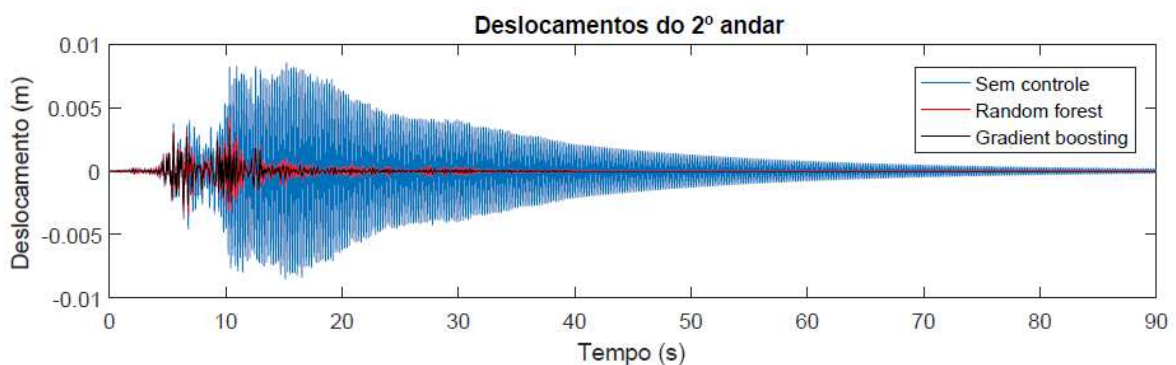


Figura 5: Deslocamentos horizontais do segundo andar da estrutura (q_2) sem controle e com controle passivo utilizando “*Random Forest Regressor*” e “*Gradient Boosting Regressor*”.

Para fins de comparação, na Tabela 1 está apresentado um resumo das magnitudes máximas dos deslocamentos, velocidades e acelerações da estrutura referentes aos graus de liberdade horizontal do primeiro e segundo andar da estrutura, respectivamente q_1 , \dot{q}_1 , \ddot{q}_1 , q_2 , \dot{q}_2 e \ddot{q}_2 , bem como as reduções obtidas com o uso dos controles. São apresentados também os módulos máximos das forças de controle (f_c). Valores *rms* da resposta estão apresentados na Tabela 2.

	Sem controle	Controle ótimo	<i>Clipped Optimal</i>	<i>Clipped Optimal Config. 1</i>	<i>Clipped Optimal Config. 2</i>	<i>Random Forest</i>	<i>Gradient Boosting</i>
q_1 (m) Redução q_1	0,0038	0,0013 65,67%	0,0016 57,89%	0,0018 52,63%	0,0019 50,00%	0,0018 52,63%	0,0015 60,53%
q_4 (m) Redução q_4	0,0086	0,0031 63,95%	0,0037 56,98%	0,0040 53,49%	0,0043 50,00%	0,0042 51,16%	0,0034 60,47%
\dot{q}_1 (m/s) Redução \dot{q}_1	0,1193	0,0352 70,19%	0,0451 62,20%	0,0488 59,09%	0,0520 56,41%	0,0466 60,94%	0,0424 64,46%
\dot{q}_4 (m/s) Redução \dot{q}_4	0,2586	0,0787 69,57%	0,0894 65,43%	0,1005 61,14%	0,1089 57,89%	0,1061 58,97%	0,0792 69,37%
\ddot{q}_1 (m/s ²) Redução \ddot{q}_1	4,1684	1,1638 72,08%	1,5712 62,31%	1,4911 64,23%	1,6455 60,52%	1,5053 63,89%	1,6334 60,81%
\ddot{q}_4 (m/s ²) Redução \ddot{q}_4	8,3416	2,6979 67,66%	3,1028 62,80%	3,3327 60,05%	3,4834 58,24%	3,4262 58,93%	2,7353 67,21%
f_c (N)	-	1151,40	923,60	938,78	797,88	799,81	627,45

Tabela 1: Respostas máximas.

	Sem controle	Controle ótimo	<i>Clipped Optimal</i>	<i>Clipped Optimal Config. 1</i>	<i>Clipped Optimal Config. 2</i>	<i>Random Forest</i>	<i>Gradient Boosting</i>
q_1 (m) Redução q_1	0,0010 -	0,0001 86,28%	0,000015 84,46%	0,00017 83,17%	0,00018 81,99%	0,00017 83,00%	0,00014 86,00%
q_4 (m) Redução q_4	0,0023 -	0,0003 86,49%	0,00035 84,90%	0,00038 83,67%	0,00040 82,50%	0,00039 83,04%	0,00032 86,09%
\dot{q}_1 (m/s) Redução \dot{q}_1	0,0306 -	0,0033 89,22%	0,0039 87,25%	0,0043 85,95%	0,0047 84,64%	0,0046 84,97%	0,0034 88,89%
\dot{q}_4 (m/s) Redução \dot{q}_4	0,6963 -	0,0078 98,88%	0,0089 87,16%	0,0099 85,71%	0,0108 84,42%	0,0104 98,51	0,0079 98,87%
\ddot{q}_1 (m/s ²) Redução \ddot{q}_1	0,9679 -	0,0979 89,89%	0,1456 84,96%	0,1501 84,49%	0,1554 83,94%	0,1497 84,53%	0,1554 83,94%
\ddot{q}_4 (m/s ²) Redução \ddot{q}_4	2,1355 -	0,2326 89,11%	0,2651 87,59%	0,2960 86,14%	0,3252 84,77%	0,3127 85,36%	0,2338 89,05%
f_c (N)	-	284,28	158,99	144,26	128,09	118,03	175,73
Voltagem(V)	-	-	0,5841	0,4860	0,4202	0,3894	2,0849

Tabela 2: Respostas rms.

A partir dos dados apresentados observa-se que o controle ótimo LQR apresentou para todos os graus de liberdade avaliados as maiores reduções de deslocamentos, velocidades e acelerações, uma vez que os algoritmos semiativos buscam de forma indireta reproduzir suas forças de controle, situação em que os controles semiativos e ótimo teriam desempenhos equivalentes.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou numericamente o desempenho do controle semiativo utilizando AMRs aplicado a um modelo de um edifício de dois andares submetido a uma aceleração na base na direção x . Foram testadas duas técnicas de inteligência computacional como

estratégias para seleção do sinal de comando (voltagem) dos amortecedores: “*Random Forest Regressor*” e “*Gradient Boosting Regressor*”, que puderam ser comparadas à técnica *clipped optimal* utilizada por Carneiro (2009) e *clipped optimal* modificado nas configurações 1 e 2, propostas por Nagahama (2013).

Analisando os resultados é possível observar que as duas foram capazes de reduzir a resposta da estrutura de maneira eficiente. A “*Random Forest Regressor*” apresentou uma eficiência bastante próxima aos das outras três estratégias cujos resultados já eram conhecidos, tanto em termos de respostas máximas quanto de respostas *rms*, enquanto a “*Gradient Boosting Regressor*” apresentou um desempenho bastante próximo ao controle ótimo LQR, cumprindo o objetivo do trabalho, conseguindo maiores reduções do que outras quatro técnicas de controle semiativo para todos os graus de liberdade avaliados.

Portanto, este trabalho apresentou por meio de análises numéricas a eficiência das técnicas de inteligência computacional “*Random Forest Regressor*” e “*Gradient Boosting Regressor*” para a escolha da voltagem de funcionamento dos amortecedores magnetorreológicos na redução de respostas dinâmicas estruturais, ressaltando o melhor desempenho da segunda técnica, que se mostrou uma ótima alternativa para a otimização do funcionamento desses dispositivos de controle.

9 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora) e ao IF Sudeste MG pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ASCE (2000). *Computing in Civil and Building Engineering*. American Society of Civil Engineers, Stanford, California.
- Basili, M. (2006). *Controllo semi attivo di strutture adiacenti mediante dispositivi magnetoreologici: teoria, sperimentazione e modellazione*. Tese de Doutorado, Università degli studi di Roma La Sapienza, Roma.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Carneiro, R. B. (2009). *Controle Semi-Ativo de Vibrações Estruturais Utilizando Amortecedor Magnetorreológico*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília.
- Dyke, S. J. (1996). *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.
- Friedman, J. (2001). Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*, 29(5).
- Meirovitch, L. (1990). *Dynamics and Control of Structures*. Wiley, Canadá.
- Nagahama, C. V. (2013). *Análise Numérica e Modelagem Computacional de um Sistema Estrutural com Controle Semiativo de Vibração do Tipo Amortecedor Magnetorreológico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., and Carlson, J. D. (1997). Phenomenological model of magnetorheological damper. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(3):230–238.
- Valencia, L. A. L. (2011). *Estudo de Algoritmos de Controle Semi-Ativo Aplicados a Amortecedores Magnetorreológicos*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília.
- Zambrano, W. C. A. (2013). *Controle ativo de vibrações usando redes neurais artificiais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.