

ANÁLISE DO CONTROLE PREDITIVO PARA O CONTROLE DE VIBRAÇÕES UTILIZANDO INCERTEZAS PARAMÉTRICAS

Erik Taketa, eriktaketa@alunos.utfpr.edu.br¹

Fabian Andres Lara-Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br¹

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida Alberto Carazzai, 1640 CEP 86300-000 - Cornélio Procópio - PR - Brasil

Resumo: Recentemente, o controle ativo de vibrações vem recebendo uma grande atenção de pesquisadores devido ao alto potencial para aplicações industriais. Por outro lado, o controle preditivo teve um impacto significativo na engenharia de controle industrial. Diante disso, esse trabalho tem como objetivo a simulação e análise do comportamento do controle preditivo no controle ativo de vibração de um sistema mecânico considerando incertezas paramétricas. A estrutura é constituída de uma plataforma de alumínio suportada por 4 vigas de aço inoxidável (réguas) e foi aproximada como um sistema de amortecedor de massa-mola. A partir do aparato, é obtido o modelo matemático, de modo que o modelo matemático seja o mais representativo do sistema real. Para analisar os resultados, as respostas do GPC são comparadas com respostas do Regulador Linear Quadrático (LQR). Os controladores são sintonizados de forma a obter um comportamento similar da resposta em frequência. São aplicadas incertezas nos parâmetros de rigidez e amortecimento da estrutura para verificar o desempenho dos controladores. Os resultados demonstram a eficiência da metodologia utilizando o GPC.

Palavras-chave: Controle Preditivo Generalizado, Controle Ativo de Vibrações, Incertezas Paramétricas, Massa-Mola-Amortecedor

1. INTRODUÇÃO

Em um ambiente industrial, existem inúmeras fontes de vibração tais como os processos de impacto, as máquinas rotativas ou alternativas, os veículos de transporte, o fluxo de fluidos e muitos outros. A presença de vibração muitas vezes pode provocar o desgaste excessivo de rolamentos, a formação de trincas ou rachaduras, o afrouxamento dos fechos e falhas estruturais e mecânicas. Para seres humanos, a exposição ocupacional às vibrações mecânicas pode causar dores, desconforto e reduzir a eficiência no trabalho. A vibração, muitas vezes, pode ser eliminada com base na análise dinâmica da estrutura, no entanto, os custos de fabricação envolvidos na atenuação das vibrações podem ser muito altos ou inviáveis para um projeto específico. O projeto do controle de vibrações deve considerar simultaneamente a quantidade aceitável de vibração e o custo de fabricação razoável. Em alguns casos, a força de excitação é inerente à estrutura. De forma que, mesmo uma força de excitação relativamente pequena pode causar uma resposta indesejável próxima da ressonância, especialmente em sistemas ligeiramente amortecidos. Devido a isto, a aplicação do controle de vibrações em estruturas flexíveis se faz necessária (Ogata, 2010).

A engenharia de controle tem desempenhado um papel vital no avanço da ciência e da engenharia, tornando-se assim, parte importante e integral dos processos industriais modernos. O controle de sistemas dinâmicos mostra sua importância devido ao fato de que todos os sistemas podem receber perturbações que afetam a saída do sistema, e assim, retirados do seu comportamento normal, seja por causa de ruídos ou vibrações indesejáveis. Devido a isto, o controle de vibrações é considerado um desafio tecnológico altamente relevante (Rao e Yap, 2011).

Por outro lado, o Controle Preditivo, ou como também é conhecido Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC, do inglês, Model Based Predictive Control), é uma das técnicas de controle moderno que se originou no final dos anos setenta e se desenvolveu consideravelmente desde então. O termo Controle Preditivo não designa a uma estratégia de controle específica, mas sim, uma ampla gama de métodos de controle que fazem uso explícito de um modelo do processo para obter o controle ao minimizar critérios de desempenho. Ultimamente, esses métodos têm se constituído como uma das técnicas de controle moderno que possui um grande impacto no controle de processos industriais (Maciejowski, 2002). Dentro das técnicas de controle preditivo se destaca o Controle Preditivo Generalizado (GPC) o qual foi desenvolvido para ser superior às técnicas aceitas na época, como variância mínima generalizada e alocação de polos. Dessa forma, o GPC pode ser utilizado para controlar uma planta simples definida como um sistema estável em malha aberta ou uma planta com pouco conhecimento prévio mais complexa, tal como fase não mínima, instável em laço aberto e com tempo morto variável.

Em engenharia, um sistema deve ser projetado de maneira a atender alguns requisitos, tais como: realizar o serviço

com precisão, economia, segurança, robustez. Porém, em muitos casos, apenas uma análise determinística não é capaz de avaliar a confiabilidade de um sistema mecânico. Ao considerar incertezas paramétricas que possam existir, pode-se analisar a robustez do projeto desse sistema. Diante da ampla abordagem do GPC e da crescente necessidade do controle de vibrações, o presente trabalho utiliza a técnica do GPC para solucionar os problemas de vibrações em uma estrutura flexível de um Grau De Liberdade (GDL) incluindo incertezas em seus parâmetros.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O primeiro passo para a análise do presente sistema é a obtenção de seu modelo matemático, após isso, os controladores utilizados e uma análise considerando incertezas paramétricas são apresentados. Por fim, é apresentado a metodologia de desenvolvimento.

2.1 Modelagem Matemática

Sistemas lineares com múltiplos GDLs comportam-se como uma combinação de múltiplos sistemas de um GDL. Diante disso, a presente contribuição utiliza de um sistema massa-mola-amortecedor de 1 GDL pela simplicidade do sistema, visto que, a técnica de controle utilizada é o grande foco desse estudo. A Fig. 1 apresenta o sistema mecânico estudado.

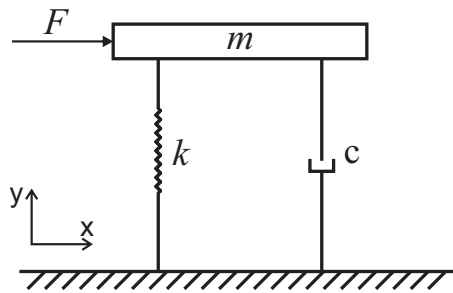


Figura 1: Sistema Massa-Mola-Amortecedor de 1 GDL.

A equação do movimento do sistema apresentado na Fig. 1, é dada por:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

Em que, m é a massa, k é a rigidez, c é o amortecimento viscoso, x é o deslocamento e F é a força de excitação. Aplicando a transformada de Laplace na equação do movimento do sistema (Eq. (1)). Considerando condições iniciais nulas, obtém-se:

$$ms^2X(s) + csX(s) + kX(s) = F(s) \quad (2)$$

Note que a equação fica no domínio de Laplace " s ". A Eq. (2) pode ser organizada como uma relação entre a saída e a entrada.

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} = \frac{1/m}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

A função $H(s)$ é conhecida como Função de Transferência do sistema. Onde a frequência natural é dada por $\omega_n = \sqrt{k/m}$ e o fator de amortecimento $\xi = c/(2m\omega_n)$.

Outra maneira de modelar a equação do movimento é mediante a representação em espaço de estados. Este tipo de representação descreve o sistema no domínio do tempo e é mais conveniente para representar sistemas não-lineares e multivariáveis do que a função de transferência.

Geralmente, a modelagem em espaço de estado está relacionada entre si por meio de equações de primeira ordem e é composta de um conjunto de variáveis de entrada, de saída e variáveis de estados.

Para exemplificação do método de espaços de estados utilizaremos a equação do movimento (Eq. (1)) apresentada anteriormente.

Esse sistema é de segunda ordem, significando que ele contém dois integradores. Porém deseja-se simplificar nossa equação para sistemas de primeira ordem. Vamos definir as variáveis de estado x_1 e x_2 como:

$$x_1 = x(t) \quad (4)$$

$$x_2 = \dot{x}(t) \quad (5)$$

Substituindo as variáveis de estado e considerando $f(t) = u$ na equação do movimento temos:

$$m\ddot{x}_2 + c\dot{x}_2 + kx_1 = u \quad (6)$$

Portanto, para o sistema de 1 GDL mostrado na Fig. 1 a representação do modelo em espaço de estados é da seguinte forma:

$$\dot{x}_1 = x(t) = x_2 \quad (7)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{k}{m}x_1 - \frac{c}{m}x_2 + \frac{1}{m}u \quad (8)$$

A equação de saída:

$$y = x_1 \quad (9)$$

Dessa forma, as Eq. 7, Eq. 8 e Eq. 9 podem ser reescritas na forma matricial, como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \{u\} \quad (10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

As Eq. 10 e Eq. 11 estão escritas na forma padrão de espaço de estados:

$$\dot{x} = [A]\{x\} + [B]\{u\} \quad (12)$$

$$y = [C]\{x\} + [D]\{u\} \quad (13)$$

Onde, A é uma matriz quadrada, chamada de matriz de estado ou matriz dinâmica, B é uma matriz de entradas; y é o conjunto dos sinais de saída; C é a matriz de saída e D é a matriz de transmissão direta.

2.2 Controlador Regulador Linear Quadrático

A teoria de controle ótimo, em especial a do regulador linear quadrático (LQR, em inglês, *Linear Quadratic Regulator*), consiste na suposição de se adotar um índice de desempenho mediante o qual é possível otimizar grandezas físicas. Segundo Ogata (2010), o problema do regulador linear quadrático permite determinar a matriz $[G]$ do vetor de controle ótimo dado pela Eq. 14 a fim de minimizar o índice de desempenho J dado pela Eq. 15

$$u(t) = -[G]x(t) \quad (14)$$

$$J = \int_0^\infty \left(\{x(t)\}^T [Q_{lqr}] \{x(t)\} + \{u(t)\}^T [R_{lqr}] \{u(t)\} \right) dt \quad (15)$$

No qual, $[Q_{lqr}]$ é uma matriz hermitiana definida positiva ou semi-definida positiva ou real simétrica e $[R_{lqr}]$ é uma matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica. Ogata (2010) destaca que o segundo termo do lado direito da Eq. 15 representa o consumo de energia dos sinais de controle.

Substituindo a Eq. 14 na Eq. 15 e fazendo as devidas simplificações, obtém-se:

$$J = \int_0^\infty \left(\{x(t)\}^T \left([Q_{lqr}] + [G]^T [R_{lqr}] [G] \right) \{x(t)\} \right) dt \quad (16)$$

Para minimizar o índice de desempenho J é necessário fazer:

$$\{x(t)\}^T \left([Q_{lqr}] + [G]^T [R_{lqr}] [G] \right) \{x(t)\} = - \frac{d(\{x(t)\}^T [P_{lqr}] \{x(t)\})}{dx} \quad (17)$$

Ogata (2010) mostra que a matriz de ganho $[G]$ é dada pela Eq. 18.

$$[G] = [T_{lqr}]^{-1} ([T_{lqr}]^T)^{-1} [B]^T [P_{lqr}] \quad (18)$$

No qual a matriz $[T_{lqr}]$ é a matriz singular dada por:

$$[R_{lqr}] = [T_{lqr}]^T [T_{lqr}] \quad (19)$$

A matriz $[P_{lqr}]$ é obtida resolvendo a equação matricial de Riccati, dada pela Eq. 20.

$$[A]^T [P_{lqr}] + [P_{lqr}] [A] - [P_{lqr}] [B] [R_{lqr}]^{-1} [B]^T [P_{lqr}] + [Q_{lqr}] = 0 \quad (20)$$

Substituindo a matriz $[P_{lqr}]$ obtida na Eq. 20 na Eq. 18, determina-se o valor da matriz de ganho $[G]$, que é dada na seguinte forma:

$$[G] = R_{lqr}^{-2} (B^T P_{lqr} + T_{lqr}^T) \quad (21)$$

$$u(t) = -[G]x(t) \quad (22)$$

2.3 Controle Preditivo Generalizado

Existe várias estratégias de controle preditivo baseado em modelo, essas estratégias diferem uma da outra, principalmente no modelo da planta utilizado e as funções de custo a minimizar para a obtenção do controle. Entre os vários métodos baseados em controle preditivo destaca-se o controle preditivo funcional de Richalet *et al.* (1987) e controle preditivo generalizado de Clarke *et al.* (1987). Neste trabalho será utilizado o controle preditivo generalizado. A lei de controle é obtida mediante a minimização de uma função de custo quadrático como mostra na Fig. 2.

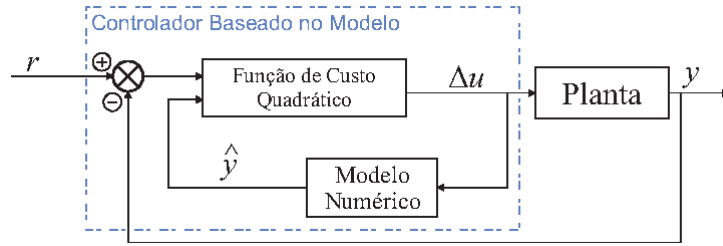


Figura 2: Esquema de Controle do GPC

A lei de controle preditiva consiste em um algoritmo que calcula uma sequência futura de controle Δu . Os principais elementos do controlador preditivo são o modelo numérico da planta para calcular a saída preditiva $\hat{y}$ e a função de custo quadrática para minimização do erro futuro: $r - \hat{y}$ em um horizonte de predição finito h (Lara-Molina, 2012). Resumidamente, a Fig. 3 apresenta o esquema de funcionamento do horizonte de predição e os fundamentos do controle preditivo baseado no modelo pode ser apresentado da seguinte maneira:

1. Definir um modelo numérico da planta para prever a saída futura $\hat{y}$.
2. Minimizar uma função de custo quadrática em um horizonte finito de predição h utilizando a predição do erro $r - \hat{y}$. Para isto a trajetória de referência deve ser definida no tempo futuro.
3. Com a minimização da função de custo quadrática, obter uma sequência ótima de incrementos no controle Δu no horizonte finito de predição h .
4. Considerar apenas o primeiro elemento da sequência ótima de controle Δu que será aplicado à planta, sendo os outros elementos desta sequência não considerados.

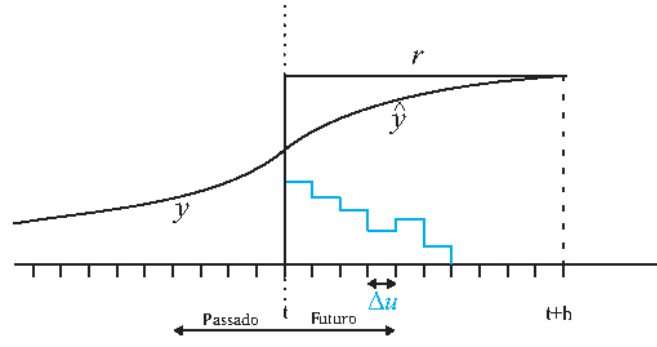


Figura 3: Horizonte Recente de Predição

5. De acordo com a estratégia de controle baseada no horizonte recente de predição (em inglês, *receding horizon control strategy*), realizar a iteração do procedimento anterior no período de amostragem seguinte para calcular novamente o incremento da sequência ótima Δu .

Posteriormente, os princípios e uma breve descrição da formulação do controle preditivo generalizado são apresentados, permitindo assim, introduzir os princípios do projeto do GPC e a implementação na estrutura e no mecanismo paralelo. Esta técnica de controle foi desenvolvida por Clarke *et al.* (1987). Na teoria de GPC linear, a planta é modelada mediante o modelo CARIMA:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + \frac{C(z^{-1})\xi(t)}{\Delta(z^{-1})} \quad (23)$$

Com $u(t)$, $y(t)$ a entrada e saída da planta, $\xi(t)$ o ruído branco Gaussiano, e $C(z^{-1})$ modela a influência do ruído. O operador diferença $\Delta(z^{-1}) = 1 - z^{-1}$ ajuda a eliminar o ruído estático ao introduzir uma ação integradora no modelo. O controle é obtido mediante uma minimização da função quadrática de custo J dada por:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [r(t+j) - \hat{y}(t+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u(t+j-1)^2 \quad (24)$$

Em que, N_1 define o início e N_2 define o fim do horizonte de predição da saída, e N_u define o horizonte de controle. λ é o fator de ponderação, $r(t)$ é a referência, $\hat{y}(t)$ é a saída obtida solucionando a equação diofantina, e $u(t)$ é o sinal de controle. O princípio de horizonte recente de predição (em inglês, “*receding horizon*”) estabelece que só o primeiro valor da sequência ótima de controle resultante $\Delta u(t)$ da minimização da função de custo quadrática ($\delta J / \delta \Delta u$) da Eq. 24 é aplicado ao sistema. Para o período de amostragem o seguinte processo é repetido.

O projeto do controlador consiste em ajustar os parâmetros: N_1 , N_2 , N_u e λ para satisfazer o comportamento de entrada e saída conservando os requisitos de estabilidade (Boucher e Dumur, 1996); com esta estratégia de controle, é obtido o controlador na forma RST. Portanto, o controlador GPC na forma RST corresponde às expressões apresentadas a seguir:

$$S'(z^{-1})\Delta(z^{-1})u(t) = R'(z^{-1})y(t) + T'(z)r(t) \quad (25)$$

O controlador RST resultante é mostrado na Fig. 4. As expressões correspondentes aos polinômios RST são:

$$R'(z^{-1}) = \sum_{j=N_1}^{N_2} (m_j F_j) \quad (26)$$

$$S'(z^{-1}) = 1 + z^{-1} \sum_{j=N_1}^{N_2} (m_j I_j) \quad (27)$$

$$T'(z^{-1}) = \sum_{j=N_1}^{N_2} (m_j z^{j-N_2}) \quad (28)$$

Em que, $b(t)$ e $d(t)$ são perturbações do sistema.

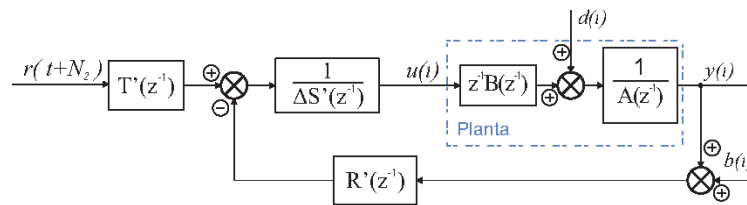


Figura 4: GPC na forma RST

2.4 Análise de Incertezas

Todo projeto de controle é realizado a partir de um modelo do sistema dinâmico, que procura representar a dinâmica do sistema com fidelidade. Entretanto, este modelo, que em sua maioria é representado como um sistema linear invariante no tempo, possui incertezas em relação ao sistema real. Isto ocorre, principalmente, devido a incertezas nos parâmetros e incertezas dinâmicas. As incertezas nos parâmetros são originadas pela imprecisão dos parâmetros físicos, devido as variações destes parâmetros durante a operação e ao erro de medição. Já as incertezas dinâmicas, consistem na omissão de componentes dinâmicos no modelo linear que ocasiona variações no comportamento dinâmico durante a operação (Silva, 2005).

Com a evolução computacional e softwares com o processamento cada vez mais rápidos, é amplamente utilizado os métodos de simulação numérica. A simulação de Monte Carlo é o principal método de simulação numérica dos modelos estocásticos que utilizam de amostragem da função de densidade de probabilidade. Porém esse método tem o custo computacional elevado. Com o intuito de reduzir esse custo são utilizadas técnicas de amostragem (Lara-Molina *et al.*, 2014).

2.4.1 Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo permite calcular a resposta dinâmica de um sistema com incertezas através de variáveis aleatórias modeladas por meio de distribuições de probabilidades (Oliveira, 2008). O nome "Monte Carlo" teve sua primeira aplicação para uma classe de métodos matemáticos por cientistas trabalhando no desenvolvimento de armas nucleares na década de 40. A essência dessa invenção é baseada em jogos de azar cujo o comportamento e resultados podem ser usados para analisar o comportamento aleatório. O método recebe esse nome em homenagem a cidade que é famosa por seus cassinos e jogos de azar (Kalos e Whitlock, 2008).

Em sistemas mecânicos é comum encontrar problemas onde as técnicas aproximativas não atendem as expectativas para uma análise de desempenho. Dessa forma, utiliza-se a simulação, como o método de Monte Carlo. Porém, em problemas que possuem uma probabilidade pequena de incerteza, utilizar uma amostragem simples pode levar a necessidade de geração de um grande número de amostras, assim, obtendo um elevado custo computacional. Diante disso, se faz o uso de técnicas de amostragem.

Existem várias técnicas de amostragem, em que pode-se citar a Amostragem Melhorada, Assintótica, por Variáveis Antitéticas, por Importância e a Amostragem por Hipercubo Latino. Além disso é possível utilizar algumas destas técnicas em conjunto (Santos, 2014).

Especificamente, nesta contribuição utiliza-se a amostragem por hipercubo latino devido ao seu desempenho verificado em estudos prévios Koroishi *et al.* (2012) e Shields e Zhang (2016). A amostragem por hipercubo latino gera amostras esparsas, de forma que uma distribuição uniforme seja obtida, assim, uma maior região do espaço amostral é coberta.

2.5 Procedimento Numérico

O sistema analisado na presente contribuição é apresentado na Fig. 5, é constituído de uma plataforma de alumínio sustentado por quadro vigas de aço inoxidável, esse sistema é aproximado a um sistema massa mola amortecedor de 1 grau de liberdade conforme apresentado anteriormente na Fig. 1.

Os parâmetros do sistema mecânico foram determinados através de um processo de identificação de parâmetros, onde foram obtidos os valores conforme a Tab. 1 (Colombo *et al.*, 2017).

Tabela 1: Parâmetros da Estrutura

Parâmetros da Estrutura	
Massa (Kg)	1,5962
Rigidez (N/m)	6777,4
Amortecimento (N.s/m)	8,0559

A inclusão de incertezas paramétricas no projeto serve para demonstrar a robustez e confiabilidade que o sistema é capaz de controlar mesmo que não exista exatidão dos parâmetros, por exemplo, dimensões mal medidas, devido a precisão do equipamento, processo de identificação mal ajustado, variação devido a condições externas, etc. Diante disso,

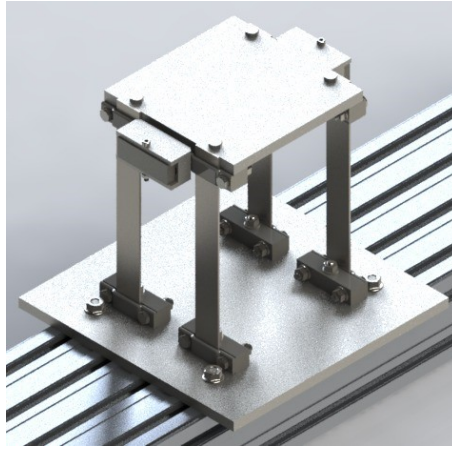


Figura 5: Estrutura

verifica-se a importância da utilização da variabilidade dos parâmetros do projeto. Para analisar os controladores foi utilizado uma variação de 10% em ambos parâmetros, rigidez e amortecimento da estrutura.

Os controladores foram sintonizados de forma que as amplitudes da função de resposta em Frequência (FRF) ficassem próximas.

2.5.1 Sintonia do Controlador LQR

O controlador foi sintonizado para obter uma resposta com um pequeno amortecimento. Para a sintonização do controlador LQR foi realizado através do método de tentativa e erro. Assim, foram obtidos os parâmetros mostrados a seguir:

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$R = 0,025 \quad (30)$$

Resolvendo a equação de Riccati, apresentado na equação 20, obtemos o valor de P_{lqr} .

$$P_{lqr} = \begin{bmatrix} 228,8704 & 0,0001 \\ 0,0001 & 0,0539 \end{bmatrix} \quad (31)$$

O ganho obtido do controlador LQR foi de:

$$K_{LQR} = [0,0148 \quad 8,2212] \quad (32)$$

2.5.2 Sintonia do Controlador GPC

Para a sintonização dos parâmetros do controlador GPC N_1 , N_2 , N_u e λ foram realizadas sucessivas tentativas para a escolha dos melhores ganhos, dessa forma obteve o seguintes parâmetros: $N_1 = 1$, $N_2 = 40$, $N_u = 1$ e $\lambda = 2,18 \times 10^{-5}$. Obtendo assim, os seguintes valores para os polinômios RST:

- $R = 1,3063e4 - 2,5800e4z^{-1} + 1,2987e4z^{-2}$
- $S = 1,0000 - 0,9745z^{-1} - 0,0255z^{-2}$
- $T = 1,5179 + 1,3989z^{-1} + 1,4122z^{-2} + 1,5592z^{-3} + 1,8376z^{-4} + 2,2418z^{-5} + 2,7625z^{-6} + 3,3874z^{-7} + 4,1011z^{-8} + 4,8857z^{-9} + 5,7212z^{-10} + 6,5860z^{-11} + 7,4575z^{-12} + 8,3125z^{-13} + 9,1279z^{-14} + 9,8817z^{-15} + 10,5528z^{-16} + 11,1224z^{-17} + 11,5741z^{-18} + 11,8941z^{-19} + 12,0725z^{-20} + 12,1026z^{-21} + 11,9817z^{-22} + 11,7112z^{-23} + 11,2963z^{-24} + 10,7463z^{-25} + 10,0741z^{-26} + 9,2961z^{-27} + 8,4316z^{-28} + 7,5026z^{-29} + 6,5331z^{-30} + 5,5483z^{-31} + 4,5743z^{-32} + 3,6372z^{-33} + 2,7624z^{-34} + 1,9741z^{-35} + 1,2943z^{-36} + 0,7425z^{-37} + 0,3351z^{-38} + 0,0847z^{-39} + 0z^{-40}$

Dessa forma, temos as seguintes características frequenciais do sistema corrigido:

- Margem de ganho = 32,12 dB
- Margem de fase = 87,68°
- Margem de atraso = 43,36 $\times T_e$

3. RESULTADOS

A fim de analisar o comportamento da dinâmica do sistema controlado são introduzidas as incertezas paramétricas na rigidez e amortecimento da estrutura massa-mola-amortecedor de 1 GDL. A análise numérica é realizada de três maneiras, sem o controle do sistema, com o controle LQR e com o controle GPC.

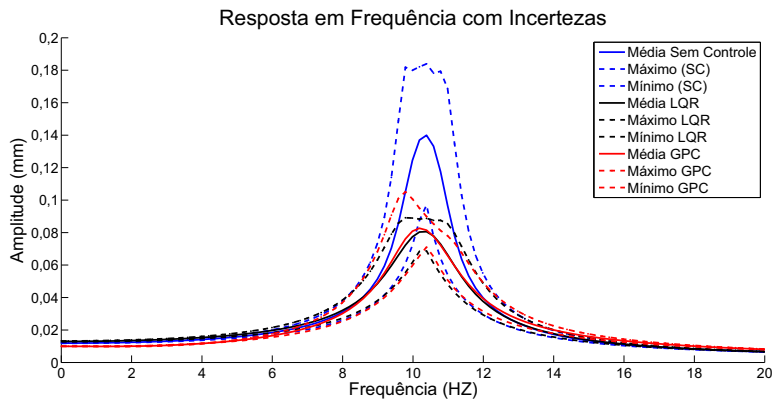


Figura 6: FRF com incertezas

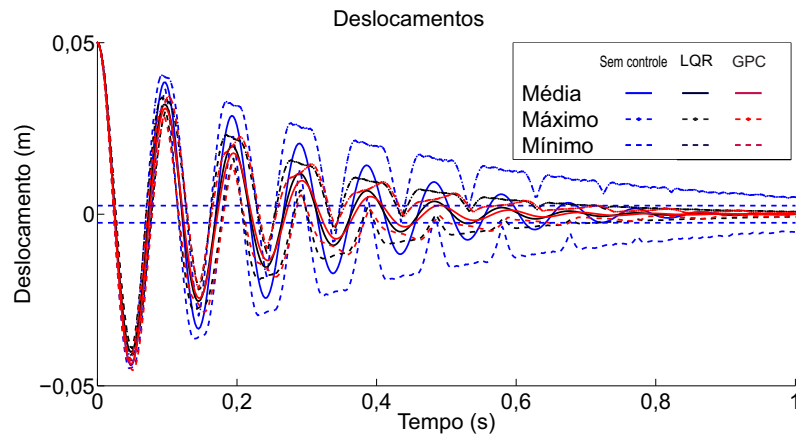


Figura 7: Deslocamentos com incertezas

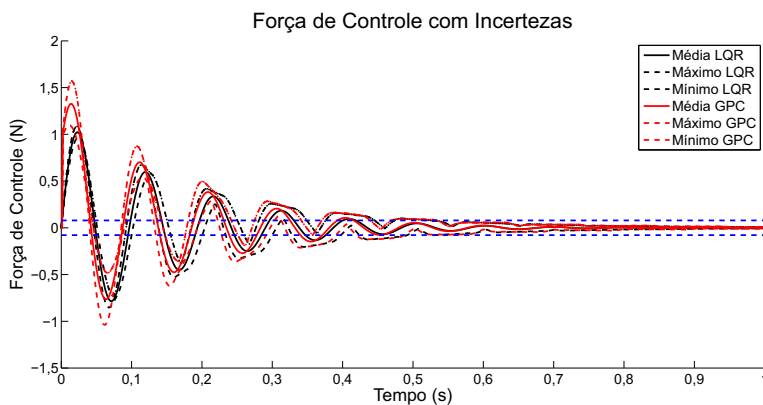


Figura 8: Força de controle com Incertezas

Na Fig. 6 é possível verificar que os controladores apresentam uma redução da amplitude da FRF quando comparado com o sistema sem controle. Este comportamento está relacionado com a resposta no domínio do tempo da Fig. 7, em que a redução do deslocamento até a estabilização no estado de equilíbrio possui tempo e amplitudes menores para os sistemas controlados. Como observado o efeito das incertezas deteriora o desempenho do sistema controlado, especificamente aumentando o tempo de estabelecimento e também aumentando a amplitude no deslocamento.

A força de controle apresentado na Fig. 8 apresenta uma maior amplitude para o controlador GPC em comparação com

o LQR. Assim, percebe-se um melhor desempenho do LQR quando considera o esforço de controle e os deslocamentos apresentados nas Fig. 7 e Fig. 8. Porém, o desempenho de ambos controladores se mantém próximos.

Os resultados numéricos permitiram avaliar a eficiência dos controladores mesmo aplicando incertezas nos parâmetros.

4. CONCLUSÕES

A análise do sistema considerando as incertezas paramétricas, pode verificar o funcionamento do controle mesmo com variações na rigidez e no amortecimento da estrutura, tanto para o LQR quanto para o GPC. Esta análise permitiu avaliar a robustez dos controladores a incertezas paramétricas. Este estudo analisa o desempenho do controle GPC para o controle de vibrações, uma técnica pouco utilizado para essa aplicação.

É possível verificar na Fig. 7, que o envelope de deslocamentos máximos e mínimos utilizando o controlador GPC fica menor quando comparado com o LQR. Isso indica que o GPC apresenta uma melhor resposta quando aplicado incertezas.

Apesar dos resultados da força de controle da estrutura massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade, apresentarem melhores desempenho com a utilização do LQR, o GPC também se mostra uma ferramenta capaz de atender ao controle de vibrações, ficando com os resultados próximo ao LQR.

Em geral, os resultados apresentados demonstram a eficiência da metodologia apresentada, visto que, o controle GPC satisfaz o controle de vibração e obteve um melhor desempenho considerando os valores máximos e mínimos dos deslocamentos.

Como perspectivas futuras poderá realizar as simulações em sistemas mais complexos para o controle ativo de vibrações e também definir métodos para uma melhor sintonia do controlador GPC para o controle de vibrações.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Cornélio Procopio. O primeiro autor agradece a CAPES pelo auxílio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Boucher, P. e Dumur, D., 1996. *La commande prédictive*, Vol. 8. Editions Technip.
- Clarke, D.W., Mohtad, C. e Tuffs, P.S., 1987. "Generalized predictive control - part i. the basic algorithm". *Automatica*, Vol. 23, No. 2, pp. 137–148.
- Colombo, D., Taketa, E., Repinaldo, J.P., Koroishi, E.H. e Lara-Molina, F.A., 2017. "Identificação de parâmetros através de técnicas heurísticas de otimização". *Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações - DINCON, 2017. São José do Rio Preto - SP*.
- Kalos, M.H. e Whitlock, P.A., 2008. *Monte carlo methods*. John Wiley & Sons.
- Koroishi, E.H., Cavalini Jr, A.A., de Lima, A.M. e Steffen Jr, V., 2012. "Stochastic modeling of flexible rotors". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 34, No. SPE2, pp. 574–583.
- Lara-Molina, F.A., 2012. *Simulação e Implementação Experimental de um Controlador Preditivo Generalizado para um Robô Orthoglide baseado na Modelagem Dinâmica*. Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brazil.
- Lara-Molina, F.A., Koroishi, E.H. e STEFFEN JR, V., 2014. "Análise estrutural considerando incertezas paramétricas fuzzy". *Técnicas de Inteligência Computacional com Aplicações em Problemas Inversos de Engenharia*. Omnipax, Vol. 1, No. 1, pp. 133–144.
- Maciejowski, J.M., 2002. *Predictive control: with constraints*. Pearson education.
- Ogata, K., 2010. *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson Prentice Hall, São Paulo-SP, Brazil, fifth edition edition.
- Oliveira, M.H.d.F., 2008. *A avaliação econômico-financeira de investimentos sob condição de incerteza: uma comparação entre o método de Monte Carlo e o VPL fuzzy*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Rao, S.S. e Yap, F.F., 2011. *Mechanical vibrations*, Vol. 4. Prentice Hall Upper Saddle River.
- Richalet, J., el Ata-Doss, S.A., Arber, C., Kuntze, H., Jacobasch, A. e Schill, W., 1987. "Predictive functional control-application to fast and accurate robots". *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 20, No. 5, pp. 251–258.
- Santos, K.R.M.d., 2014. *Técnicas de amostragem inteligente em simulação de Monte Carlo*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Shields, M.D. e Zhang, J., 2016. "The generalization of latin hypercube sampling". *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 148, pp. 96–108.
- Silva, S., 2005. *Projeto de Controladores Robustos para Aplicações em Estruturas Inteligentes Utilizando Desigualdade Matriciais Lineares*. Master's thesis, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, Brazil.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANALYSIS OF PREDICTIVE CONTROL FOR THE VIBRATION CONTROL USING PARAMETRIC UNCERTAINTIES

Erik Taketa, eriktaketa@alunos.utfpr.edu.br¹

Fabian Andres Lara-Molina, fabianmolina@utfpr.edu.br¹

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

¹Federal University of Technology – Parana, 1640, Alberto Carazzai Ave., Cornelio Procópio - PR, Zip Code: 86300-000, Brazil

Abstract: Recently, active vibration control has been getting a lot of attention from researchers because of the high potential for industrial applications. On the other hand, predictive control had a significant impact on industrial control engineering. Therefore, this work has as target, the simulation and analysis of the behavior of the predictive control using the active vibration control on a mechanical system considering parametric uncertainties. A structure and consisting of an aluminum platform supported by 4 stainless steel beams (rulers) and it was approximated as a mass-damper-stiffness system. From the apparatus, the mathematical model is obtained, and this mathematical model must be as representative as possible of the real system. To analyze the results, the GPC responses are compared with Linear Quadratic Regulator (LQR) responses. The controllers are tuned to a behavior similar to the frequency response. The uncertainties are applied in stiffness and damping parameters of structure. The results demonstrate the performances by using the GPC methodology.

Keywords: Generalized Predictive Control, Active Vibration Control, Parametric Uncertainties, Mass Damper Stiffness