

Controle e supressão de *galloping* em cabos de transmissão de energia elétrica usando controladores semi-ativos não lineares

Palavras Chave: Controle; Sistemas não-lineares; Galloping

Autores:

Autor: Vitor Marcelo Rodrigues Campos, FEM, UNICAMP

Orientador: Josué Labaki Silva, FEM, UNICAMP

Co-Orientador: José Augusto Ignácio da Silva, POLI, USP

1. INTRODUÇÃO

O *galloping* é um fenômeno de vibração autoexcitada causada por escoamentos turbulentos em estruturas como cabos de energia, podendo levar à falha por fadiga. Estratégias de controle, passivas e ativas, foram desenvolvidas para mitigá-lo. Embora as técnicas passivas sejam simples, sua eficácia diminui em condições variáveis, tornando as ativas mais vantajosas para robustez.

Este projeto estuda o uso de uma suspensão eletromagnética **semi-ativa** para controlar o *galloping* em cabos de transmissão. A proposta inclui a análise de um modelo semi-analítico não linear, visando reduzir os efeitos do fenômeno. Os resultados podem ampliar o entendimento do controle semi-ativo de vibrações, aplicável também a outras estruturas sujeitas a vibrações autoexcitadas, como edifícios e aeronaves.

2. MODELO MATEMÁTICO PARA O *galloping* AEROELÁSTICO

O modelo de estudo para o fenômeno de *Galloping* em cabos de transmissão de energia elétrica consiste em um prisma retangular rígido, com massa m e altura h , sustentado por uma suspensão elástica de rigidez k e por um amortecedor linear viscoso c , que representa a dissipação estrutural do sistema.

Tal modelo é representado de maneira esquemática pela Figura 1, em que o prisma está sofrendo efeitos de escoamento de ar na direção horizontal, representado por U , fazendo com que desta forma ocorra movimento de deslocamento no sistema apenas no eixo y , perpendicular ao escoamento e representado pelo fenômeno de *plunge*,

gerando a força aerodinâmica $F_p(t)$ que excita o prisma no fenômeno de *galloping*.

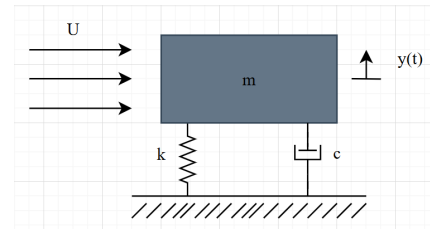


Figura 1: Representação esquemática do sistema

A equação de movimento para o sistema descrito anteriormente pode ser escrita por:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_p \quad (1)$$

Onde a força aerodinâmica F_p , responsável pelo efeito de *plunge* pode ser modelada abaixo, possuindo o termo $C_{FI}(\dot{y}(t))$, que é o seu coeficiente de sustentação, que nesta modelagem será considerada uma aproximação quase estacionária deste coeficiente de acordo com a referência [1].

$$F_p(\dot{y}(t)) = \frac{1}{2}\rho U^2 h C_{FI}(\dot{y}(t)) \quad (2)$$

Para baixas frequências de oscilação este modelo pode prever com precisão o fenômeno de *galloping*, de tal forma que o coeficiente de sustentação aerodinâmica pode ser ajustado por uma curva polinomial em função da velocidade do prisma. Tal ajuste pode ser visto pela equação abaixo:

$$C_{FL}(\dot{y}(t)) = C_f^l\left(\frac{\dot{y}}{U}\right) - C_f^c\left(\frac{\dot{y}}{U}\right)^3 \quad (3)$$

De tal forma que C_f^l e C_f^c são os coeficientes de ajuste da equação. Considerando uma adimensionalização no tempo e no espaço da Eq.(1), é possível escrever:

$$\eta'' + \eta = n(A_1\eta' - A_3\eta'^3) \quad (4)$$

onde $\omega_s = (k/m)^{1/2}$ é a frequência natural do prisma, $\zeta = c/(2m\omega_s)$ é o fator de amortecimento estrutural, $\eta = y/h$ é o deslocamento adimensional do prisma, $\tau = \omega_s t$ é o tempo adimensional, $(\cdot)'$ e $(\cdot)''$ indicam as derivadas de primeira e segunda ordem em relação τ , $n = \rho_f h^2/(2m)$ é a razão de massa, e $A_1 = VC_f^l - \frac{2\zeta}{n}$ e $A_3 = \frac{C_f^l}{V}$.

3. INCLUSÃO DA AÇÃO DE CONTROLE ATIVO

Este trabalho atua na proposta de controle ativo da bifurcação induzida pelo fenômeno de *galloping* aerelástico. Para tal fim, uma força de controle $u(t)$ é considerada no modelo matemática, de maneira que a Eq. (1) pode ser reescrita como:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_p + u(t) \quad (5)$$

Duas estratégias de controle são consideradas neste trabalho. A primeira lei de controle é focada em reduzir as amplitudes de ciclo limite no regime pós-crítico, sem se preocupar com o aumento do envelope de *galloping* (i.e., aumento da velocidade crítica de ocorrência do fenômeno), e para isso considera uma lei de controle puramente não linear, na forma $u(t) = -G_3\dot{y}^2$. A segunda estratégia é focada em aumentar o valor da velocidade crítica de *galloping* e reduzir as amplitudes de ciclo limite no regime pós-crítico, sendo considerada uma lei de controle híbrida com termos lineares e não lineares na forma, $u(t) = -G_1\dot{y} - G_3\dot{y}^2$. Portanto, considerando o mesmo processo de adimensionalização anteriormente introduzido, é possível escrever o modelo matemático na seguinte forma:

$$\eta'' + \eta = n(A_1\eta' - A_3\eta'^3) + G_3h^2\eta'\eta'^2 + G_1\eta' \quad (6)$$

A inclusão do termo linear na ação de controle $-G_1\dot{y}$, promove um aumento na velocidade crítica de *galloping* (i.e., expansão do envelope), de maneira que a velocidade crítica com a ação de controle é dada por:

$$V_c = \frac{2m}{\rho h C_f^l} \left(2\zeta\omega_s - \frac{G_1}{m} \right) \quad (7)$$

4. ANÁLISE VIA MÉTODOS DE PERTURBAÇÃO

O modelo matemático em análise é essencialmente não linear. Neste sentido, para caracterização dinâmica e análise da ação de controle o método do balanço harmônico é utilizado para construir soluções semi-analíticas para tal problemática. Desta forma, este método considera que a resposta do sistema pode ser escrita por [2]:

$$\eta = Ae^{\tau j} + \bar{A}e^{-\tau j} \quad (8)$$

Substituindo a Eq.(8) na Eq.(6), é possível obter:

$$\begin{cases} \eta'' + \eta = 0 \\ nje^{\tau j}(A_1A - 3A_3A^2\bar{A} - \frac{G_1}{nm}A - \frac{G_3h^2}{nm}A^2\bar{A}) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Logo, reajustando as novas relações de A_1 e A_3 , e utilizando as relações de $A = 0.5ae^{\alpha j}$ e $\bar{A} = 0.5ae^{-\alpha j}$, é possível obter a nova resposta do sistema com a introdução dos termos de controle.

$$\begin{cases} A_1 = VC_f^l - \frac{2\zeta}{n} - \frac{G_1}{nm} \\ A_3 = \frac{C_f^l}{V} - \frac{G_3h^2}{nm} \end{cases} \quad (10)$$

E desta forma, obtêm-se a relação final de amplitude.

$$a = \sqrt{\frac{4A_1}{3A_3}} \quad (11)$$

A amplitude da ação de controle também pode ser avaliada analiticamente por:

onde U é a amplitude do sinal de controle, considerando a primeira estratégia. Desta forma, foram obtidas todas as respostas analíticas desejadas para a análise dos resultados posteriormente. Ressalta-se que para a obtenção da bifurcação do sistema sem a ação de controle, basta considerar $G_1 = G_3 = 0$ na Eq.(11).

Para construção dos resultados via modelo matemático, as Eq.(11) e (17) são utilizadas para construir os diagramas de bifurcação que caracteriza o fenômeno de *galloping*, com o intuito de verificar se a estratégia proposta é capaz de mitigar tal fenomenologia. No intuito de validar os resultados obtidos via método do balanço harmônico, a Eq.(6) é resolvida numericamente utilizando o método de Runge-Kutta, sendo utilizada a função *ode45* no MATLAB, para efeito de validação da solução analítica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO SISTEMA SEM CONTROLE

Conhecendo as expressões das soluções analíticas e numéricas para o sistema, é necessário estabelecer valores e intervalos numéricos para análise dos resultados. Desta forma, serão tomados os seguintes valores para cada variável: Intervalo de $V = [0.1, 10]$ com passo de 0.01, $m = 1.5\text{Kg}$, $\rho = 1.09\text{Kg/m}^3$, $h = 0.16\text{m}$, $\omega_s = 2\pi\text{rad/s}$, $C_f^l = 2.69$, $C_f^c = 168$, $C_f^q = 6270$, $C_f^s = 59900$, $\zeta = 0.0428$, $V_c = 2c/(nC_f^l)$, em que V_c é a velocidade crítica para que o efeito de *galloping* passe a ocorrer, vale ressaltar que os valores do coeficiente de ajuste foram obtidos pela referência[1] e os outros valores foram tomados de com base em sistemas reais. Desta forma, obtém-se os resultados analíticos e numéricos para o modelo aerodinâmico reduzido com equações de terceira ordem e o resultado analítico para o modelo aerodinâmico completo, que geram os seguintes gráficos.

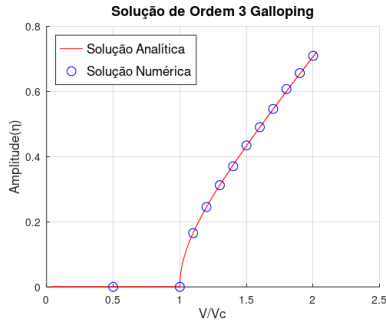


Figura 2: Amplitude de Vibração com modelo aerodinâmico reduzido

Tratando primeiramente do modelo aerodinâmico reduzido, é possível ver pela Figura 3, observar que de fato o efeito de *galloping* só é observado no sistema quando o coeficiente V é maior do V_c , da forma como havia sido inferido anteriormente. Outro fato interessante é observar como a amplitude de vibração η tende a crescer de maneira acelerada com o aumento do valor da razão entre V e V_c , mostrando que o sistema se torna mais instável com o aumento dos valores de V , que está diretamente relacionado a força excitadora do escoamento externo. Por fim, deve-se observar que a solução numérica do sistema apresenta grande proximidade com a solução analítica, mostrando que de fato a escolha do modo de análise numérica foi adequada.

Em seguida, comentando sobre o modelo aerodinâmico completo, é possível ver que a sua solução analítica não caracteriza uma função, pois ela possui intervalos com mais de um valor real de η para uma mesma razão de V/V_c , o que torna a análise deste sistema mais complexa. Outro ponto interessante é que a amplitude inicial muito se assemelha ao modelo simplificado aerodinâmico e que em

algum momento, a amplitude de vibração acaba tomando tal perfil.

Outra análise interessante pode ser feita variando os valores do coeficiente de amortecimento do sistema e observar as implicações de tais mudanças no mesmo. Para isso, foram estudados dois novos valores para este coeficiente, sendo eles, $\zeta = 0.007$ e $\zeta = 0.12$, ou seja, valores maiores e menores do que o original de estudo, e para isso, utilizou-se o modelo aerodinâmico reduzido, obtendo-se os seguintes resultados.

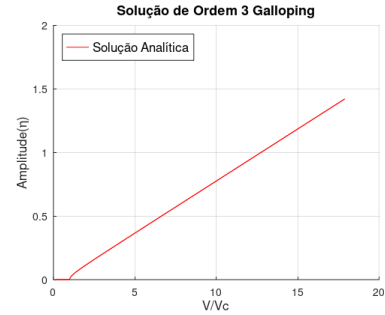


Figura 3: Amplitude de vibração para $\zeta = 0.007$

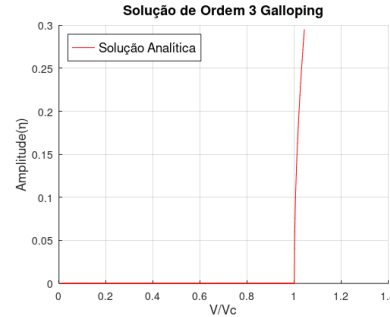


Figura 4: Amplitude de vibração para $\zeta = 0.12$

Com isso, pode-se observar que com o aumento do coeficiente de amortecimento, o aumento da amplitude de vibração após a razão $V/V_c > 1$ é mais agressivo para os seguintes valores desta razão, e que para um coeficiente de amortecimento menor, a amplitude aumenta de maneira mais controlada em um mesmo intervalo de velocidades. Porém, é importante frisar que por mais que o aumento de amplitude para maiores valores do coeficiente de amortecimento seja mais repentino, ele atinge valores menores de amplitude em um mesmo intervalo de excitação externa comparado ao menor valor de amortecimento, tornando este um ponto que deve ser analisado antes da escolha do sistema.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO SISTEMA COM CONTROLE

Com as soluções analíticas e numéricas do sistema, e conhecendo o comportamento do mesmo sem a utilização de técnicas de controle, é possível observar primeiramente, sobre as mesmas condições do sistema original, que com a adição de um controlador genérico com valores de G_1 e G_3 diferentes de zero, é possível já obter uma resposta em amplitude de vibração que possui uma magnitude consideravelmente menor do que o modelo aerodinâmico reduzido da figura 3.

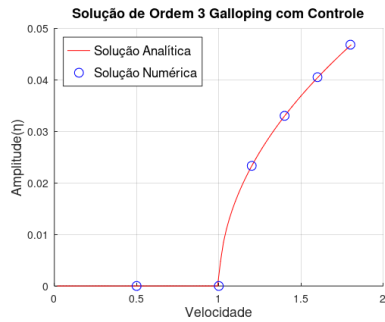


Figura 5: Amplitude de Vibração do modelo aerodinâmico reduzido com controle

Desta forma, sabendo que o efeito desejado foi obtido, o próximo passo é compreender a atuação da variável G_1 e G_3 sobre o sistema, ou seja, confirmar se de fato o ganho de controle G_1 é responsável por deslocar a resposta de amplitude no eixo X, modificando a velocidade crítica, e se o ganho de controle G_3 é de fato responsável por "achatar" curva de amplitude, como o controlador foi planejado durante a fase anterior. Desta forma, sabendo que a solução numérica valida a resposta analítica obtida, é possível fazer uma análise individual das contribuições de G_1 e G_3 , começando por estabilizar o valor de $G_1 = 0.5$ e variar G_3 , como pode ser visto abaixo.

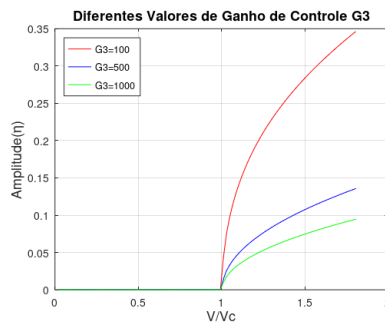


Figura 6: Amplitude de Vibração do modelo aerodinâmico reduzido para diferentes valores de G_3

O gráfico de amplitude de vibração acima mostra o que era de se esperar, ganhos maiores de G_3 resultam em mag-

nitudes menores de amplitude de vibração, e que o implemento de um valor de ganho qualquer apresenta grande ação sobre o sistema, porém, o aumento de tais ganhos apresenta uma diminuição de crescimento de efetividade, que pode ser vista que para um ganho de $G_3 = 500$, ao ser dobrado para $G_3 = 1000$, ele já não apresenta uma grande diminuição na amplitude de oscilação. Desta forma, é possível observar a ação do ganho de controle G_3 sobre o sistema, e ele de fato atende ao que foi proposto no início do projeto, de fato "achatar" a curva original do sistema, diminuindo a amplitude de ação do *galloping*.

Em seguida, é possível observar o impacto do ganho de controle G_1 , que foi apresentado como o intuito de deslocar a curva de amplitude pelo eixo X, aumentando a V_c do sistema.

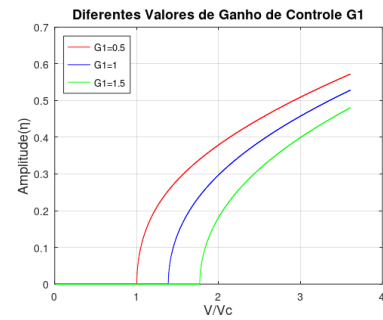


Figura 7: Amplitude de Vibração do modelo aerodinâmico reduzido para diferentes valores de G_1

Como pode ser visto pelo gráfico acima, com o aumento de G_1 , a velocidade crítica do sistema aumenta, de tal forma que com um pequeno ganho como $G_1 = 1.5$, a Velocidade crítica do sistema quase dobrou com relação ao seu valor original, ou seja, a curva de fato é deslocada para a direita com a implementação de G_1 , o que de fato era pretendido na implementação do controlador. Além disso, lembrando da relação da equação 18, é possível obter uma relação ainda mais interessante do aumento da velocidade crítica do sistema como aumento do ganho de controle G_1 , e tal gráfico pode ser visto abaixo.

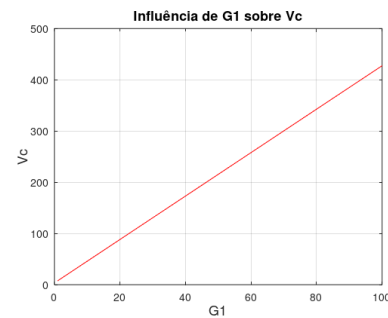


Figura 8: Relação da V_c com G_1

O primeiro ponto e o mais importante é que como es-

perado, o ganho de controle G_1 apresenta uma influência linear sobre a velocidade crítica V_c do sistema, e que a velocidade crítica pode atingir valores extremamente elevados para altos valores de G_1 , já que a velocidade crítica do sistema é dada em m/s , e que originalmente, o range de trabalho da velocidade V era de 0 à $10 m/s$, ou seja, para altos valores de G_1 , o fenômeno de *galloping* só ocorreria em valores maiores do que a V_c , que para um caso de $G_1 = 100$, seria um valor de pelo menos $V_c = 400 m/s$ para que o fenômeno comece a atuar.

Por fim, conhecendo os efeitos dos controladores propostos, e verificando que eles apresentam uma boa efetividade para o problema proposto, além de corresponderem com o que se era esperado no projeto inicial, uma análise final será feita com relação a força de controle do sistema, que foi obtida pela equação 28, em que a expressão da norma da força de controle $\bar{F}$ foi obtida, e a sua atuação, em questão de amplitude para um controlador com $G_1 = 0.5$ e $G_3 = 100$, é possível obter o seguinte gráfico.

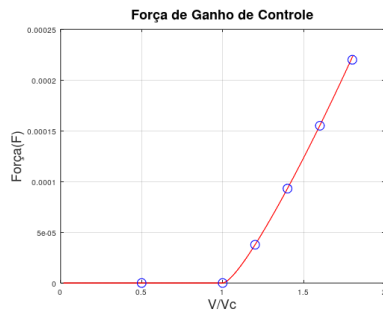


Figura 9: Força de controle

Pode-se observar de maneira clara que após a velocidade V superar a velocidade crítica V_c , a força de ganho de controle começa a aumentar, o que era esperado, pois o sistema necessita de um maior esforço por parte dos controladores, de tal maneira com que quanto maior o valor de V/V_c , maior a força de controle $\bar{F}$ necessária para que o a curva de amplitude η do sistema seja "achatada".

Olhando de maneira comparativa, como era de se esperar, quanto maior o valor do ganho de controle G_3 , maior a força de controle $\bar{F}$ do sistema, que é importante lembrar que apresenta valor adimensionalizado neste gráfico, ou seja, pode-se fazer um paralelo que desta forma, há um maior consumo de energia para amortecer de maneira mais agressiva a auto-excitação do sistema, e desta forma, a depender das condições de operação dos cabos de transmissão elétrica, condições ótimas de desempenho podem ser estabelecidas como um limite entre os valores máximos de G_1 e G_3 de tal forma que o sistema apresente uma amplitude de vibração η dentro do aceitável, sem grandes implementos de ganhos de controle. Desta forma,

tal relação descrita acima, pode ser vista no gráfico abaixo.

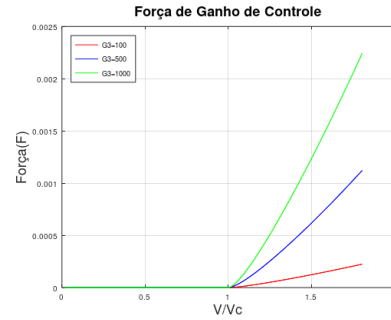


Figura 10: Comparação das forças de controle

7. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o fenômeno de *galloping* apresenta amplitudes de vibração elevadas, com um crescimento constante, conforme a velocidade V incide sobre os cabos de transmissão de energia elétrica, podendo gerar falha por fadiga no sistema. Desta forma, foi proposto o uso de controladores semi-ativos não lineares para buscar amenizar o problema de *galloping* para níveis aceitáveis de operação, de tal forma que ambas as propostas de atuação sobre o sistema foram bem sucedidas, sendo elas o aumento da velocidade crítica para que o fenômeno de *galloping* se inicie, e a diminuição das amplitudes de oscilação do fenômeno. Em seguida, foi feita uma análise referente a força de controle do sistema com relação a diferentes ganhos de controle propostos, mostrando que quanto maior os valores de ganho de controle, maior a força de controle necessária sobre o sistema, logo, maior a energia consumida para mitigar o *galloping* sobre tal condição.

Por fim, a proposta de pesquisa foi atingida, de tal forma que uma finalização interessante para o processo seria estabelecer critérios ótimos de tolerância para o sistema, de tal maneira que uma otimização sobre o controlador seja feita, de tal forma que o sistema aplique a menor força de controle possível e ainda assim seja capaz de mitigar o *galloping* no sistema de cabos de transmissão de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] P. S. J. Païdoussis, M. P. and D. Langre, *Fluid-Structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities*. Cambridge University Press, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511760792>
- [2] A. H. Nayfeh, *Perturbation Methods*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.