



ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO REAL DE NEUTRALIZADORES DE VIBRAÇÃO PROJETADOS SOB ACOPLAMENTO COM 1 GRAU DE LIBERDADE

Igor Fernando Rodrigues

Jucélio Tomás Pereira

Eduardo Marcio de Oliveira Lopes

igor.rodriques@ufpr.br

jucelio.tomas@ufpr.br

eduardo_lopes@ufpr.br

Universidade Federal do Paraná - UFPR

Av. Cel. Francisco H dos Santos, s/n, 81530-900, Paraná, Curitiba, Brasil

Resumo. A utilização de neutralizadores dinâmicos de vibrações (também chamados de absorvedores dinâmicos de vibrações) é uma solução muito adotada no controle de vibrações, devido à sua praticidade e eficácia. Por vezes, estes dispositivos são projetados a partir de hipótese de que o acoplamento entre eles e os sistemas a controlar (sistemas primários) se dá com um grau de liberdade apenas. O corrente trabalho apresenta, então, um estudo numérico sobre o efeito que a negligência dos demais graus de liberdade do acoplamento tem na resposta do sistema composto (resultante), para diversas geometrias de neutralizadores, aplicados no controle de uma viga engastada livre. Os principais pontos analisados dizem respeito ao caráter rotacional da excitação, imposta pelo sistema primário em um neutralizador projetado para atuar sob efeito de translação apenas, e ao acoplamento entre os graus de liberdade de rotação e translação, que faz com que o sistema composto apresente uma resposta combinada, com ambos os termos. Mostra-se que, para algumas geometrias, as simplificações de 1 grau de liberdade assumidas resultam em respostas que destoam dos resultados reais do sistema composto.

Palavras-chave: Controle de vibrações, Neutralizador dinâmico de vibrações, Acoplamento de sistemas dinâmicos.

1 INTRODUÇÃO

O processo de solução das equações que governam o comportamento dinâmico de um sistema mecânico passa, via de regra, por um problema de autovalores e autovetores, cujos autovetores determinam as frequências naturais do sistema. Nestas frequências, o efeito combinado das características de inércia, amortecimento e rigidez resulta em uma redução da rigidez dinâmica da estrutura, tornando-a mais suscetível a excitações ali atuantes. Isto pode constituir algo indesejável para diversos tipos de sistemas e estruturas, que necessitarão, então, de controle do nível de vibração, resultante de fontes de excitação atuando nestas frequências.

Uma das vantagens da utilização de neutralizadores dinâmicos no controle de vibrações é que estes oferecem uma solução eficaz, sem a realização de modificações estruturais no sistema a controlar propriamente dito (visto que os neutralizadores atuam como um sistema auxiliar) e sem a alteração da fonte de vibração. Seu princípio básico de funcionamento é a inserção de rigidez dinâmica no sistema a controlar, dito sistema primário, principalmente nas suas frequências de ressonância, onde há uma queda significativa dessa grandeza. Para sistemas elementares, diz-se que o neutralizador está sintonizado com o sistema primário quando a frequência natural do neutralizador coincide com a do sistema primário, sob excitação harmônica nesta frequência. Para esta frequência, na ausência de amortecimento, os valores de rigidez dinâmica na base do neutralizador tendem a infinito, tornando o ponto de acoplamento um nó no sistema primário.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 Rigidez dinâmica

A rigidez dinâmica $S(\Omega)$ é definida como a razão entre a força aplicada $F(\Omega)$ e o deslocamento resultante $X(\Omega)$, como indicado na Eq. (1). Ela é, de forma equivalente, a força correspondente a um deslocamento unitário para uma determinada frequência Ω . Esta definição é exatamente a inversa da definição da receptância $R(\Omega)$, quantidade que é normalmente medida em ensaios experimentais. Em se tratando de neutralizadores, a rigidez dinâmica é usualmente determinada tendo como referência a sua base, uma vez que esta constitui o ponto de acoplamento com os sistemas que se deseja controlar.

$$\{F(\Omega)\} = [S(\Omega)]\{X(\Omega)\} = [R^{-1}(\Omega)]\{X(\Omega)\} = [-[M]\Omega^2 + i\Omega[C] + [K]]\{X(\Omega)\}. \quad (1)$$

A Eq. (1) relaciona, no domínio da frequência, para sistemas não girantes, a resposta do sistema com a excitação aplicada ao mesmo. A partir dessa equação é possível construir diversas funções de resposta em frequência (FRFs) para o sistema, o que permite, dentre tantas ações, o uso do método da reanálise de resposta (Brandon, 1990; Lopes, 1998). A Eq. (1) é escrita de forma matricial, onde os índices das linhas e colunas relacionam a rigidez dinâmica entre diferentes pontos ou mesmo entre diferentes graus de liberdade para um mesmo ponto. Uma das vantagens da representação de um neutralizador através de sua rigidez dinâmica está na facilidade de modelar o acoplamento entre os sistemas envolvidos (a saber, primário e auxiliar). Isso decorre de que o efeito conjunto dos sistemas no ponto de acoplamento é equivalente à soma algébrica da rigidez dinâmica calculada na base do neutralizador com a rigidez dinâmica do sistema primário para este mesmo ponto.

2.2 Acoplamento entre neutralizador e sistema primário

A geometria e os materiais de um neutralizador são os elementos que definem suas características dinâmicas, sendo especificados de forma a reduzir o movimento do sistema primário em uma determinada faixa de frequências. Além das propriedades do neutralizador, o número e tipo de graus de liberdade considerados no acoplamento também influenciam de forma significativa na resposta do sistema composto (sistema primário mais neutralizador). Embora um neutralizador seja muitas vezes projetado para atuar de forma simples (e.g., sob translação unidirecional apenas), o sistema primário sofre movimentos mais complexos, devido a imperfeições geométricas, excentricidade da excitação aplicada ou mesmo face ao próprio modo de vibrar do sistema primário. Este fato é exemplificado na Fig. (1), onde uma viga engastada-livre sujeita à uma excitação F_y é apresentada em (a), junto com seu primeiro modo de vibrar, em (b), e os respectivos diagramas de deslocamento, em (c), e rotação, em (d).

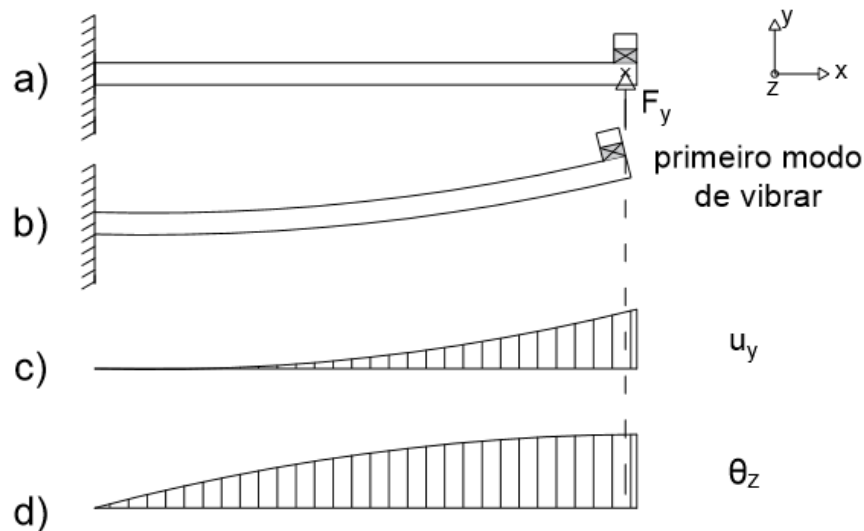


Figura 1 – Viga engastada-livre.

Esta viga apresenta uma relação entre os graus de liberdade de translação (u_y) e rotação (θ_z), posto que, quando ela se desloca verticalmente ao vibrar, há rotação entre seções adjacentes. Isto implica o fato de que a modelagem do acoplamento entre a viga e um neutralizador sob um único grau de liberdade pode não ser mais representativa em alguns casos. Nestes casos, a desconsideração dos demais graus de liberdade do acoplamento pode gerar resultados que destoam significativamente do comportamento real do sistema composto.

A matriz de rigidez dinâmica S_B^n na base de um neutralizador (NDV) sob acoplamento de 2 graus de liberdade (GDL) um de translação em y (u_y) e outro de rotação em z (θ_z), pode ser escrita, no que será o futuro ponto de acoplamento, da seguinte forma:

$$S_B^n(\Omega) = \begin{bmatrix} S_{yy}^n(\Omega) & S_{y\theta}^n(\Omega) \\ S_{\theta y}^n(\Omega) & S_{\theta\theta}^n(\Omega) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

onde cada elemento da matriz do lado direito da Eq. (2) representa uma particular rigidez dinâmica, podendo esta ser complexa – caso haja amortecimento no sistema – ou não. Esse NDV é ilustrado na Fig. (2a).

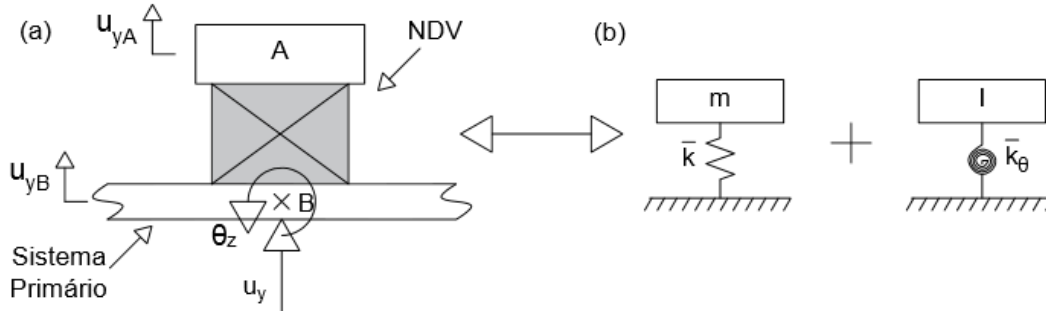


Figura 2 – Neutralizador com 2GDL.

A rigidez dinâmica correspondente do sistema primário, sob uma excitação com componentes de translação em y e rotação em z , é dada por

$$S_B^{sp}(\Omega) = \begin{bmatrix} S_{yy}^{sp}(\Omega) & S_{y\theta}^{sp}(\Omega) \\ S_{\theta y}^{sp}(\Omega) & S_{\theta\theta}^{sp}(\Omega) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Omitindo a dependência em frequência, por conveniência, tem-se, da Eq. (2) que

$$(S_B^n)^{-1} = R_B^n = \frac{1}{S_{yy}^n S_{\theta\theta}^n - S_{y\theta}^n S_{\theta y}^n} \begin{bmatrix} S_{\theta\theta}^n & -S_{y\theta}^n \\ -S_{\theta y}^n & S_{yy}^n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Devido ao fato de S_B^n ser simétrica, tem-se que $S_{\theta y}^n = S_{y\theta}^n$. Portanto,

$$R_B^n = \begin{bmatrix} \frac{1}{S_{yy}^n - \frac{(S_{y\theta}^n)^2}{S_{\theta\theta}^n}} & \frac{1}{S_{\theta y}^n - \frac{S_{yy}^n S_{\theta\theta}^n}{S_{\theta y}^n}} \\ \frac{1}{S_{\theta y}^n - \frac{S_{yy}^n S_{\theta\theta}^n}{S_{\theta y}^n}} & \frac{1}{S_{\theta\theta}^n - \frac{(S_{y\theta}^n)^2}{S_{yy}^n}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

As matrizes de rigidez dinâmica S^{sp} e de receptância R^{sp} de um sistema primário podem ser particionadas, separando-se as coordenadas que não estão associadas à inserção do neutralizador daquelas que estão. Sendo B o ponto de acoplamento, têm-se então que

$$S^{sp} = \begin{bmatrix} S_A^{sp} & S_{AB}^{sp} \\ S_{BA}^{sp} & S_B^{sp} \end{bmatrix} = (R^{sp})^{-1} = \begin{bmatrix} R_A^{sp} & R_{AB}^{sp} \\ R_{BA}^{sp} & R_B^{sp} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (6)$$

O acoplamento do neutralizador provoca uma modificação localizada de rigidez dinâmica, ΔS , em B, cujo efeito na nova matriz de receptância R^{sc} do sistema, agora composto, pode ser descrito por

$$R^{sc} = [S^{sp} + \Delta S]^{-1} = \left[\begin{bmatrix} S_A^{sp} & S_{AB}^{sp} \\ S_{BA}^{sp} & S_B^{sp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & S_B^n \end{bmatrix} \right]^{-1} = \begin{bmatrix} S_A^{sp} & S_{AB}^{sp} \\ S_{BA}^{sp} & S_B^{sp} + S_B^n \end{bmatrix}^{-1}, \quad (7)$$

em que S_B^n e S_B^{sp} são dadas, respectivamente, pelas Eqs. (2) e (3), e R^{sc} , a nova matriz de receptância, ou a matriz de receptância do sistema composto, é tal que

$$R^{sc} = \begin{bmatrix} R_A^{sc} & R_{AB}^{sc} \\ R_{BA}^{sc} & R_B^{sc} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Prova-se que (Brandon, 1990; Lopes (1998))

$$R_B^{sc} = \left[(R_B^{sp})^{-1} + S_B^n \right]^{-1}, \quad (9)$$

de modo que o efeito da inserção do neutralizador pode ser avaliado, no ponto de acoplamento, apenas com base no conhecimento das receptâncias locais do sistema primário e na rigidez dinâmica do neutralizador.

A Eq. (9) indica que a existência de acoplamento entre os graus de liberdade de translação e rotação no sistema primário, no neutralizador, ou em ambos, influencia a resposta efetiva do sistema composto, que combina todos os termos envolvidos. O efeito da negligência de graus de liberdade está diretamente relacionado, conforme esperado, com a rigidez dinâmica do neutralizador para as direções desconsideradas.

2.3 Acoplamento entre graus de liberdade do neutralizador

O acoplamento entre os graus de liberdade de rotação e translação do neutralizador dá-se, por exemplo, por excentricidades geométricas em relação ao eixo da excitação aplicada. Na vibração, tais excentricidades conduzem a esforços e, conseqüentemente, deslocamentos em outras direções, além daquela de aplicação da força.

Para geometrias simétricas, estes esforços desaparecem. Assim, na ausência de acoplamento entre os graus de liberdade do neutralizador, a Eq. (2) pode ser reescrita, tal que

$$S_B^n = \begin{bmatrix} S_{yy}^n & 0 \\ 0 & S_{\theta\theta}^n \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Isto implica que os modos de vibrar do dispositivo podem ser modelados independentemente, conforme representado na Fig. (2).

Realizando o somatório de forças na massa m do neutralizador da Fig. (2), tem-se que

$$m\ddot{u}(t) + \bar{k}(u_{yA}(t) - u_{yB}(t)) = 0. \quad (11)$$

Realizando o mesmo processo para o ponto “B” na base, onde age uma força f_y , obtém-se

$$-\bar{k}(u_{yA}(t) - u_{yB}(t)) = f_y. \quad (12)$$

Aplicando a transformada de Fourier às Eqs. (11) e (12), isolando u_a em (11), substituindo em (12) e manipulando a equação resultante, obtém-se a rigidez dinâmica de translação do neutralizador calculada em sua base, qual seja,

$$S_{yy}(\Omega) = \frac{F_y(\Omega)}{U_{yB}(\Omega)} = \left\{ \frac{-\Omega^2 m \bar{k}}{-\Omega^2 m + \bar{k}} \right\}. \quad (13)$$

De forma similar, a rigidez dinâmica de rotação do neutralizador calculada em sua base, face a um momento M_z em B, pode ser dada por

$$S_{\theta\theta}(\Omega) = \frac{M_z(\Omega)}{\theta_{zB}(\Omega)} = \left\{ \frac{-\Omega^2 I \bar{k}_\theta}{-\Omega^2 I + \bar{k}_\theta} \right\}. \quad (14)$$

Embora algumas geometrias de neutralizadores possuam modos de vibrar desacoplados, o caráter do movimento imposto pelo sistema primário faz com que o vetor de excitação na base do neutralizador excite, ao mesmo tempo, ambos os graus de liberdade do neutralizador.

3 EXEMPLOS NUMÉRICOS

A utilização de modelos numéricos para realização de análises em sistemas e componentes, ao invés da criação de um sistema físico real destinado para tal, tem-se mostrado valiosa em muitos casos, tanto pela rapidez quanto pelo baixo custo associado. O sistema composto – formado pelo sistema primário, cujos níveis de vibração se deseja controlar, por um sistema secundário acoplado a este, o neutralizador – é modelado por partes, em um software de elementos finitos (*Ansys®*), que são posteriormente associadas, utilizando a técnica de reanálise de resposta, aplicada em um software de cálculo numérico (*Matlab®*).

3.1 Sistema primário

Visando a verificação do acoplamento entre os graus de liberdade no sistema primário a ser controlado, elaborou-se um modelo numérico correspondente a uma viga engastada-livre, de seção transversal retangular, representada na Fig. (3).

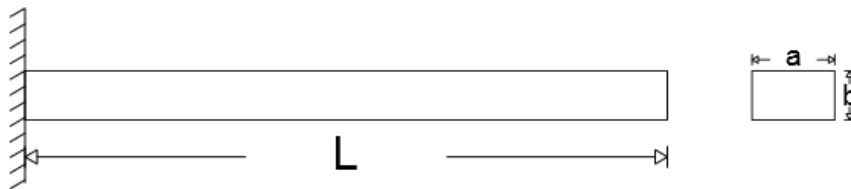


Figura 3 – Sistema primário: viga engastada-livre.

As dimensões e propriedades materiais empregadas foram as seguintes:

Tabela 1 – Dimensões e propriedades do sistema primário.

	Dimensões			Propriedades materiais	
	L (mm)	a (mm)	b (mm)	E (GPa)	ρ (Kg/m ³)
Valor	1000	50	25	210	7860

As funções resposta em frequência, obtidas numericamente, para as combinações de excitação e resposta na extremidade livre da viga, são representadas pelas curvas de amplitude de receptância da Fig. (4).

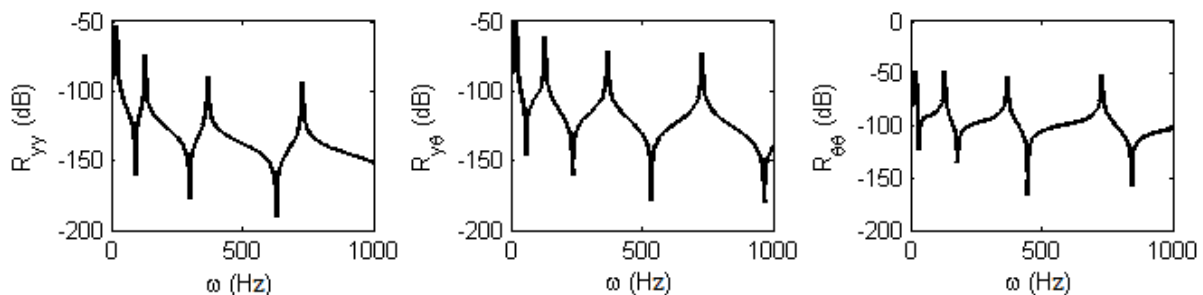


Figura 4 – FRFs do sistema primário na extremidade livre.

Nesta figura, a curva $R_{y\theta}$ é equivalente à curva $R_{\theta y}$ e representa o acoplamento entre os graus de liberdade de translação e rotação, onde a excitação em um destes ocasiona movimento

no outro. Como esperado, os picos de ressonância das curvas ocorrem para os mesmos valores de frequência.

Para visualização do efeito dos neutralizadores, estes são projetados de forma a atuar no controle das frequências próximas ao terceiro pico de ressonância do sistema primário ($\approx 368 \text{ Hz}$). Os limites para a razão de massa μ entre neutralizador e sistema primário são definidos por $0,04 < \mu < 0,05$, indicando que o neutralizador deve possuir uma massa entre 4 e 5% da massa do sistema primário.

3.2 Neutralizadores não-amortecidos

A seção 2.3 indica a dependência que a matriz de rigidez dinâmica de um neutralizador de 2 GDL têm em relação aos parâmetros de inércia e rigidez, de acordo com as Eq. (13) e (14). Para este estudo, são então definidas geometrias que ofereçam relações distintas entre estes parâmetros, incluindo geometrias assimétricas. Posteriormente, são criados modelos em elementos finitos que representem o comportamento dinâmico destes dispositivos, de onde são obtidas as respectivas curvas de rigidez dinâmica.

As análises do sistema composto são então realizadas em duas etapas: na primeira, o acoplamento entre as curvas do sistema primário e do neutralizador é realizado considerando a existência de dois graus de liberdade no acoplamento (u_y e θ_z); na segunda, tal acoplamento é realizado apenas em u_y .

Cada modelo é analisado independentemente do sistema primário, sendo sua matriz de rigidez dinâmica obtida para o ponto de acoplamento. A conexão, então é realizada, de acordo com a Eq. (7). Já as curvas de receptância são levantadas a partir da Eq. (9).

Neutralizador massa-mola

Em um neutralizador do tipo massa-mola, ilustrado na Fig. (5), a massa é ligada ao sistema primário por um elemento elástico. Trata-se de uma das configurações mais simples e usuais no controle de vibrações, tanto na teoria quanto na prática. Uma metodologia para cálculo deste tipo de neutralizador pode ser encontrada em Den Hartog (1956). Ela demonstra basicamente que o sistema secundário deve possuir a mesma frequência da excitação atuante no sistema primário para um controle efetivo.

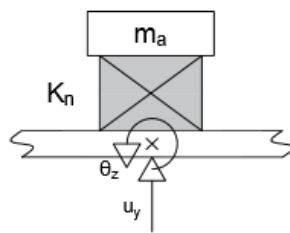


Figura 5 – Neutralizador tipo massa-mola.

Os elementos de massa e mola são prismas retangulares com as dimensões descritas na Tabela 2, onde os parâmetros h , b e p representam a altura, o comprimento e a profundidade do elemento e os sub-índices n e a indicam o elemento elástico e o elemento de massa, respectivamente. Do elemento de massa do neutralizador, são obtidas as propriedades de massa (m_a) e momento de inércia de massa (I_a). As dimensões do elemento de mola determinam as propriedades de rigidez à translação (k_n) e rigidez à rotação ($k_{\theta n}$). O elemento de massa utiliza as propriedades materiais da Tabela 1. Já o elemento de mola emprega as propriedades materiais da Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do neutralizador massa-mola.

	Dimensões (mm)					Propriedades materiais		
	h_n	b_n	p_n	h_a	b_a	p_a	E (MPa)	ρ (Kg/m ³)
Valor	2	5	5	2	5	5	20	1200

Para estas dimensões, a razão de massa entre neutralizador e sistema primário é $\mu = 0,046$, indicando que o neutralizador possui 4,6% da massa do sistema primário. As curvas de rigidez dinâmica do neutralizador, S_{yy}^n e $S_{\theta\theta}^n$, são mostradas na Fig. (6).

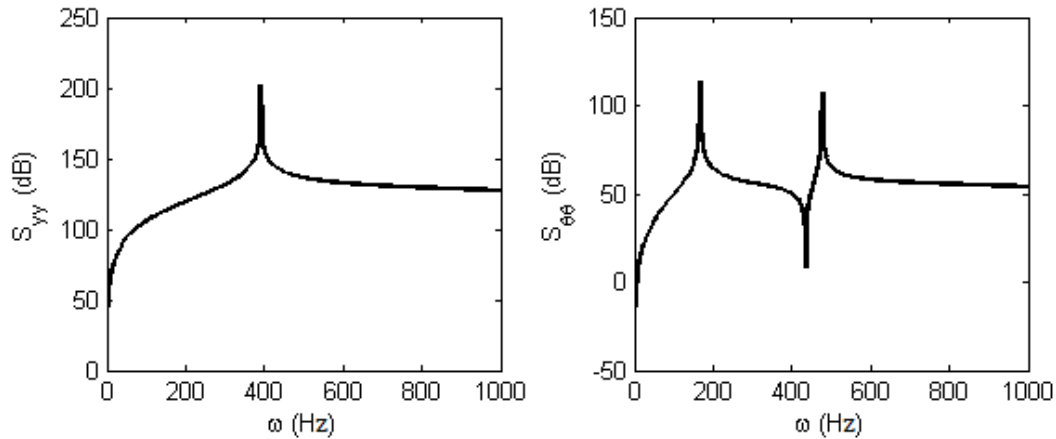


Figura 6 – Rigidez dinâmica do neutralizador massa-mola.

As amplitudes de receptância do sistema composto, antes e após a inserção deste neutralizador, considerando o acoplamento sob 1 e 2 GDL, são apresentadas na Fig. (7).

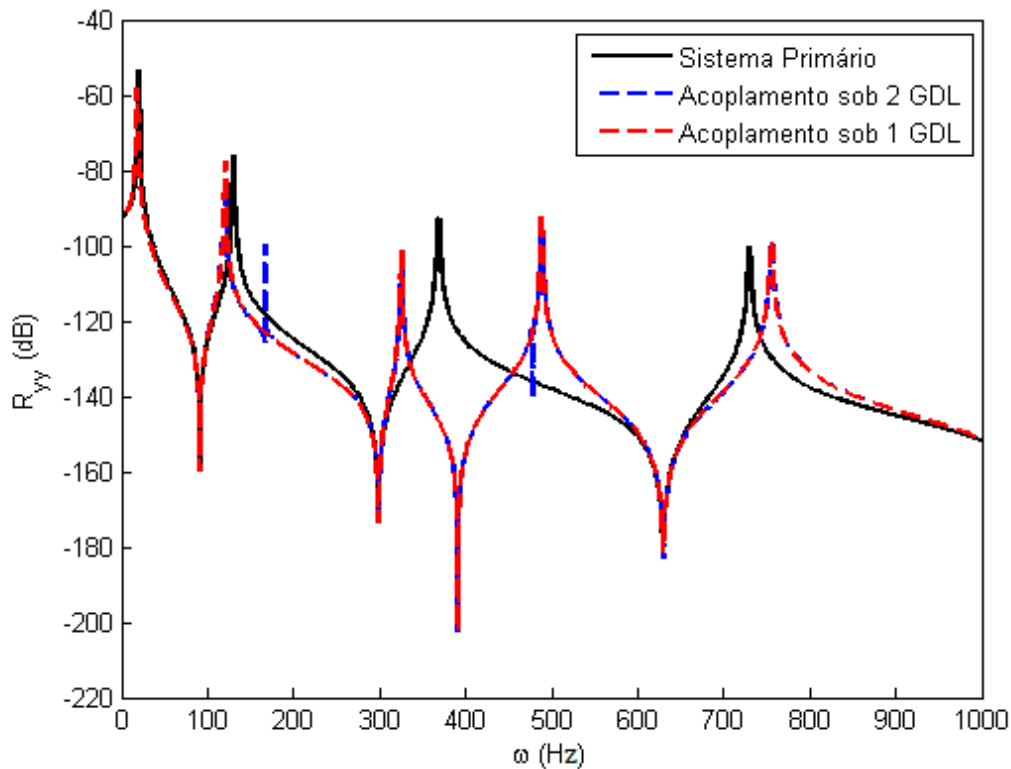


Figura 7 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador massa-mola.

Para este caso, a diferença entre o modelo considerando 2GDL no acoplamento e o modelo considerando 1 GDL é muito pequena. Mostra-se que, sem a existência de acoplamento nos graus de liberdade do neutralizador (e. g., geometrias simétricas) e com um pequeno momento de inércia rotacional neste, a consideração de acoplamento sob 1 GDL é muito bem posta para representação da resposta do sistema composto, exceto em alguns pontos ($\omega = 167$ e 477 Hz), onde ocorrem pequenas distorções. Estes pontos equivalem às frequências naturais do neutralizador para o grau de liberdade de rotação.

Essa observação instiga a avaliação destes sistemas para valores de frequências rotacionais que coincidam com as frequências naturais do sistema primário. É possível, então, utilizar uma relação de geometrias distintas, alterando a rigidez de rotação e o momento de inércia de massa, sem alteração da massa e da rigidez de translação. Considera-se, para tanto, a relação de geometrias exposta na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do neutralizador massa-mola (com alterações).

	Dimensões (mm)					
	h_n	b_n	p_n	h_a	b_a	p_a
Valor	2	10	2,5	2	5	5

Neste caso, as curvas de rigidez dinâmica passam a ser mostradas na Fig. (8).

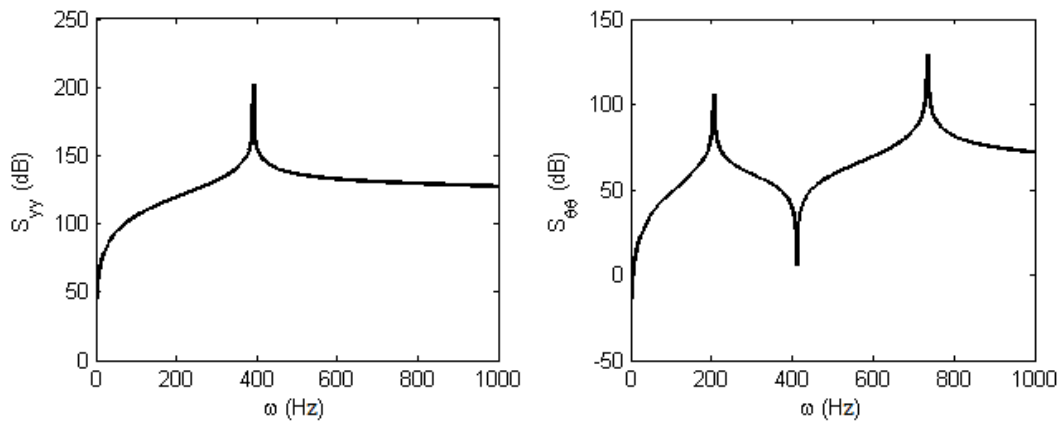


Figura 8 – Rigidez dinâmica do neutralizador massa-mola (com alterações).

Para estes valores, o segundo modo de vibrar do neutralizador, em rotação, ($\omega_n = 735$ Hz), está muito próximo do quarto modo do sistema primário ($\omega_n = 730$ Hz), criando uma grande distorção entre as curvas do sistema composto com acoplamento sob 2 GDL e com acoplamento aproximado por 1 GDL, conforme visto na Fig. (9).

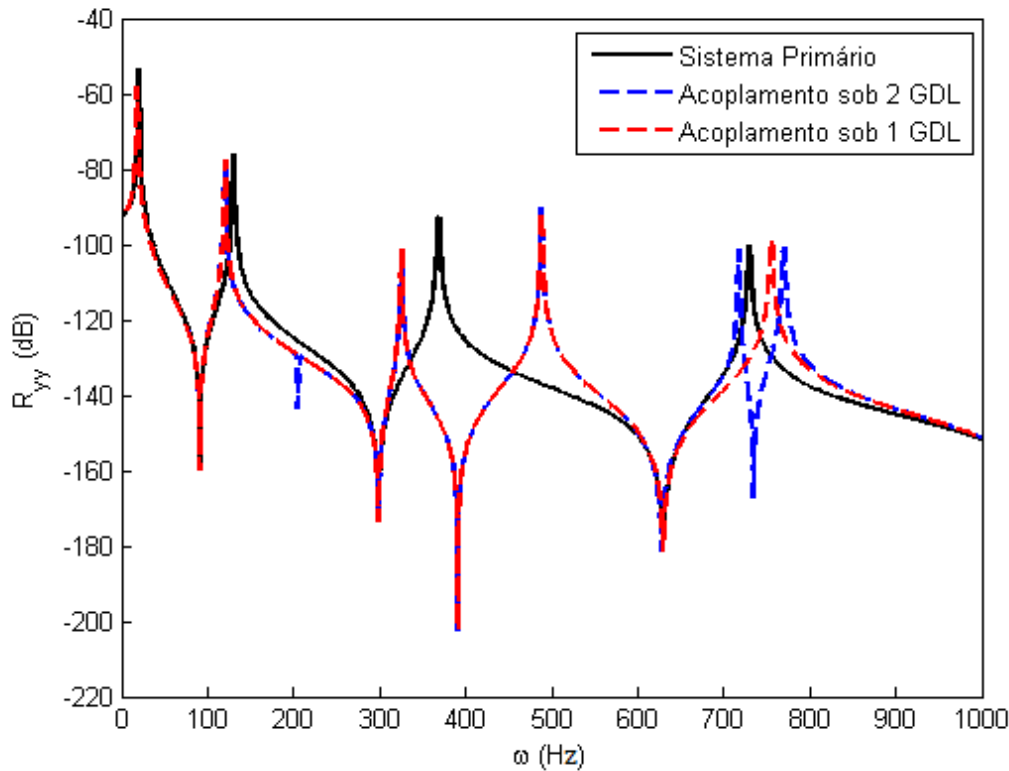


Figura 9 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador massa-mola (com alterações).

Neutralizador tipo “T”

A Fig. (10) ilustra um neutralizador tipo viga, em “T”, de caráter simétrico em relação ao eixo vertical e com seção transversal retangular. Neutralizadores com este formato podem apresentar múltiplas frequências de ressonância dentro da faixa analisada, mesmo quando considerado o acoplamento apenas sob 1 GDL. Um dos principais pontos analisados é o aumento do momento de inércia e da rigidez de rotação, sem acoplamento dos graus de liberdade do neutralizador.



Figura 10 – Neutralizador tipo “T”.

O neutralizador é composto pelo mesmo material da Tabela 1 e seus parâmetros, conforme descrito na figura acima, são tais que: $L_h = 5 \text{ mm}$, $L_a = L_b = 15 \text{ mm}$, $b = 1,7 \text{ mm}$ e $p = 1 \text{ mm}$. A razão de massa para esta geometria é de 4,8%, e as curvas de rigidez dinâmica do neutralizador, S_{yy}^n e $S_{\theta\theta}^n$, são expostas na Fig. (11). Face à simetria, não há o termo cruzado $S_{y\theta}^n$.

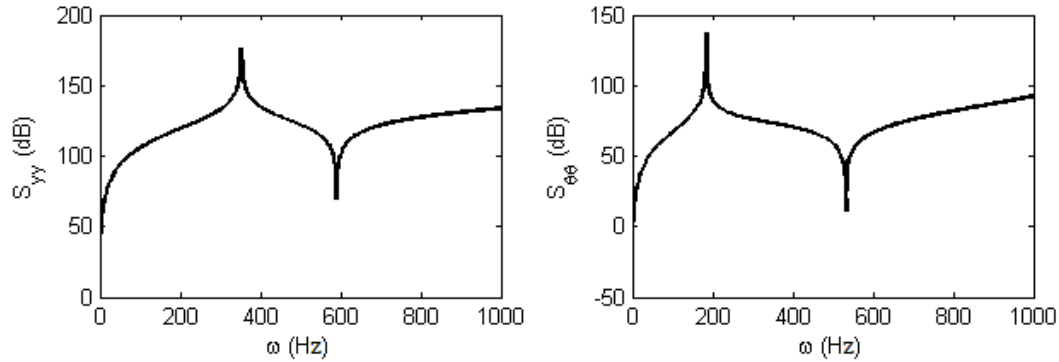


Figura 11 – Rigidez dinâmica do neutralizador tipo “T”.

As curvas de amplitude de receptância da Fig. (12) mostram que, mesmo com grande momento de inércia rotacional, a diferença entre as curvas considerando os diferentes tipos de acoplamento, embora existente, é pequena, limitando-se a um pequeno deslocamento das frequências de ressonância e uma distorção em torno da frequência correspondente aos picos de rigidez dinâmica de rotação do neutralizador.

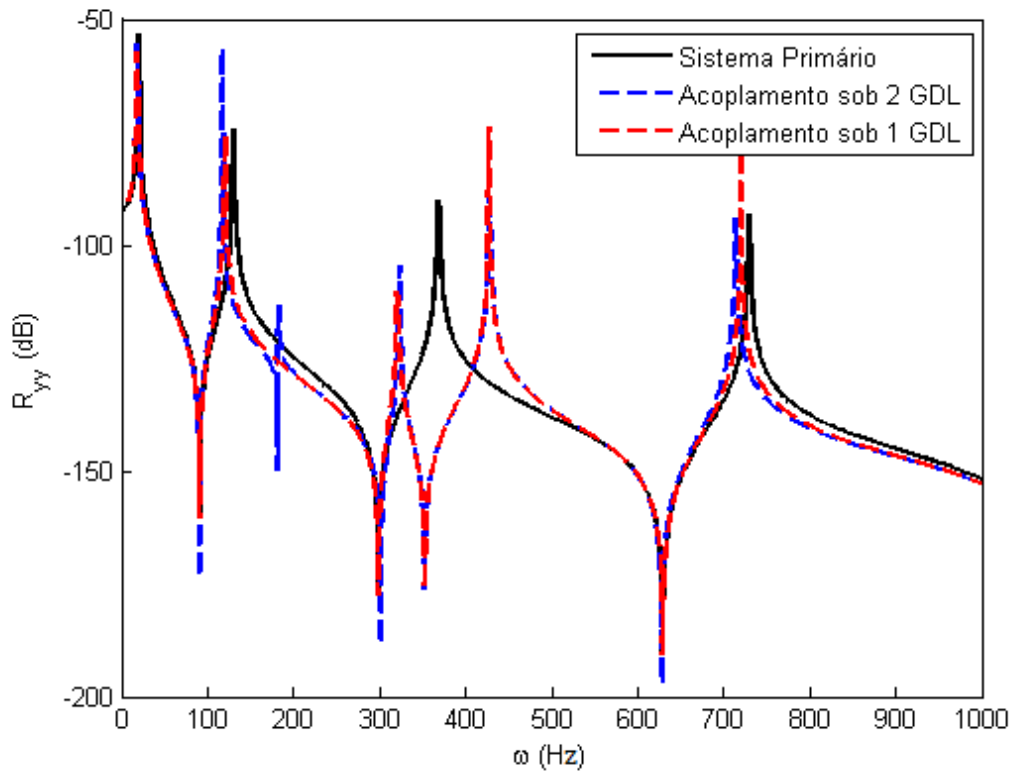


Figura 12 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador tipo “T”.

Neutralizador tipo “L”

Um neutralizador tipo viga contínua em “L”, de caráter assimétrico, com geometria similar ao neutralizador tipo “T”, como ilustrado na Fig. (13), também é utilizado.

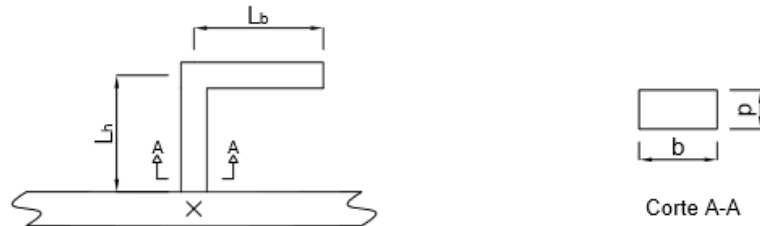


Figura 13 – Neutralizador tipo “L”.

Este neutralizador também é composto pelo material da Tabela 1 e seus parâmetros, conforme descrito na figura acima, são tais que: $L_h = 5 \text{ mm}$, $L_b = 15 \text{ mm}$ e $b = p = 1,7 \text{ mm}$. Para esta geometria, o termo cruzado $S_{y\theta}^n$ não é mais nulo, conforme mostra a Fig. (14). Isto implica que, ao deslocar-se verticalmente, o neutralizador rotaciona, provocando um momento em sua base. O mesmo ocorre quando o neutralizador rotaciona, resultando em uma força vertical em sua base. A razão de massa para essa geometria é 4,4%.

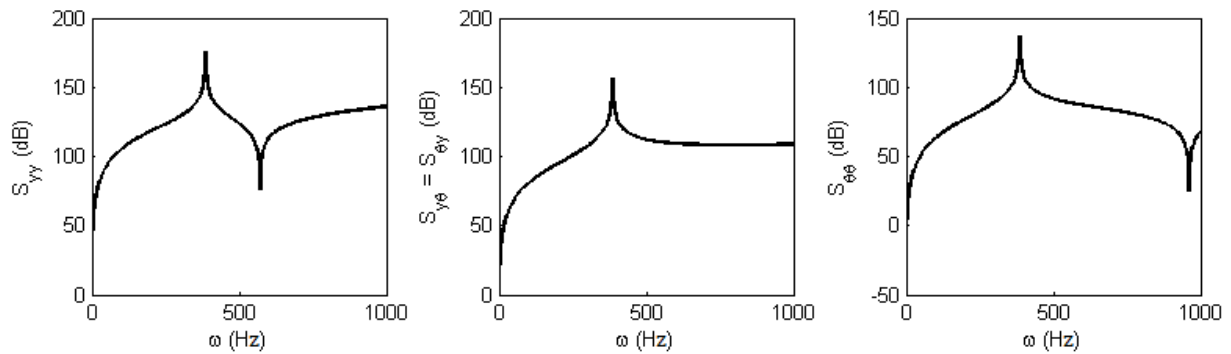


Figura 14 – Rigidez dinâmica do neutralizador tipo “L”.

Neste caso, o acoplamento entre os graus de liberdade faz com que os picos das curvas de rigidez (S_{yy}^n , $S_{y\theta}^n$ e $S_{\theta\theta}^n$) ocorra nas mesmas frequências. Isto faz com que haja um aumento considerável na rigidez dinâmica do sistema composto para estes valores, conforme visto na Fig. (15). Nota-se, agora, que a resposta é visivelmente influenciada pelo tipo de acoplamento considerado.

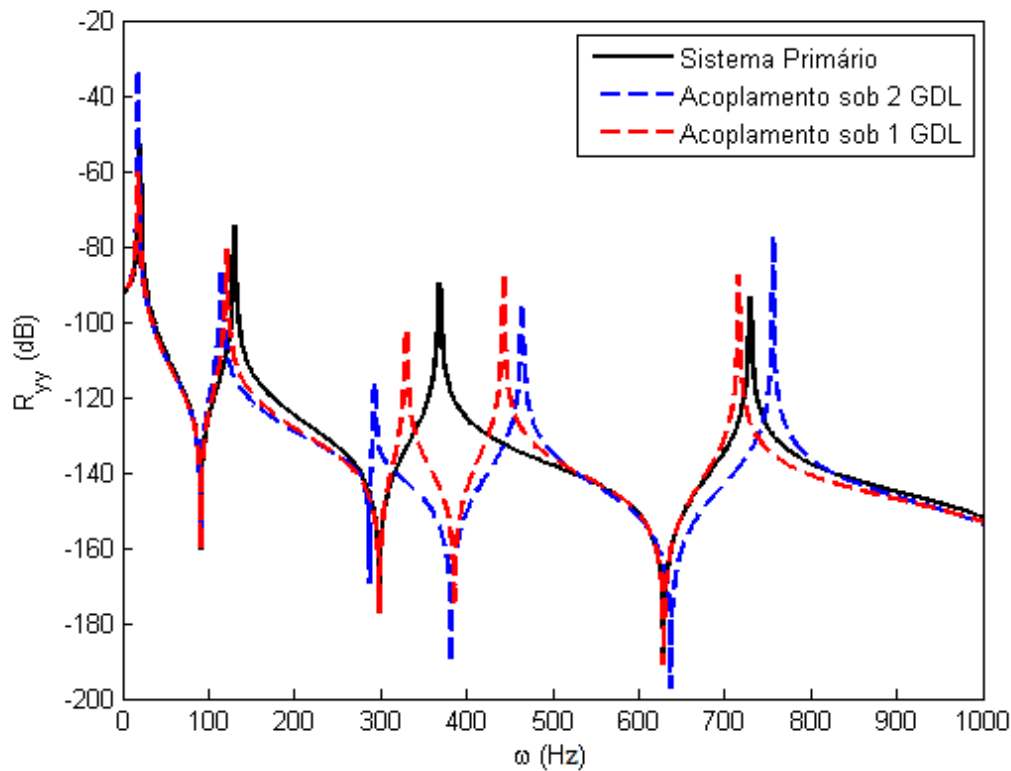


Figura 15 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador tipo “L”.

Neutralizador tipo anel

Uma geometria, similar à utilizada por Bavastrì (1997) e Bavastrì et. al. (2007), porém sem amortecimento, é aqui analisada. Esta geometria é composta por uma massa com formato anelar, ligada, através de elementos com baixo módulo de elasticidade, a um núcleo, que, por sua vez, é conectado ao sistema primário. O principal ponto analisado é o fato deste neutralizador possuir um grande momento de inércia de massa, associado a uma pequena rigidez de rotação entre esta massa e o sistema primário, o que se deve à baixa rigidez torcional do elemento de conexão entre a massa e o núcleo.

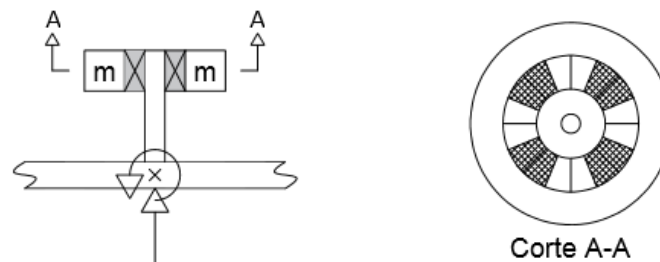


Figura 16 – Neutralizador tipo anel.

A razão de massa é entre o neutralizador, ilustrado na Fig. (16), e o sistema primário é de 4%. As curvas de rigidez dinâmica são apresentadas na Fig. (17).

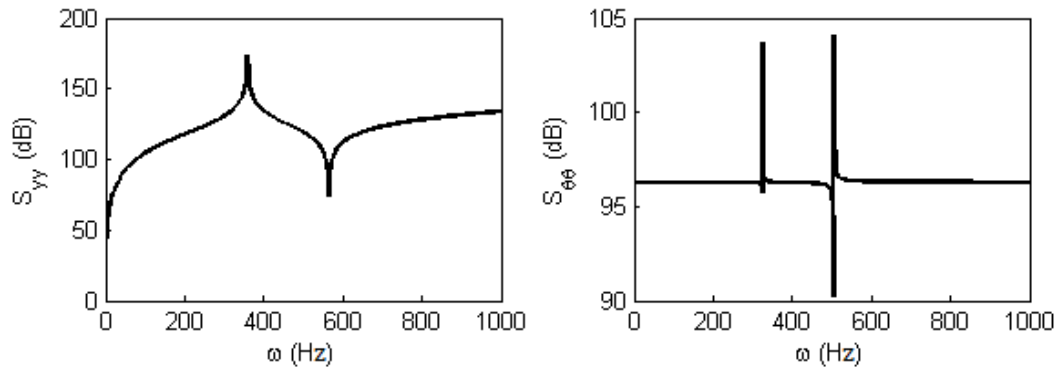


Figura 17 – Rigidez dinâmica do neutralizador tipo anel.

Na Fig. (17), nota-se que a curva para S_{yy}^n é similar às curvas análogas dos demais neutralizadores analisados. Porém, neste caso, a curva para $S_{\theta\theta}^n$ difere totalmente das anteriores, apresentando um comportamento quase constante ao longo da banda de frequências analisada. Isto causa um efeito diverso no sistema composto, onde a curva de receptância associada sofre deslocamentos consideráveis, tanto na amplitude quanto na frequência. Isso é ilustrado na Fig. (18).

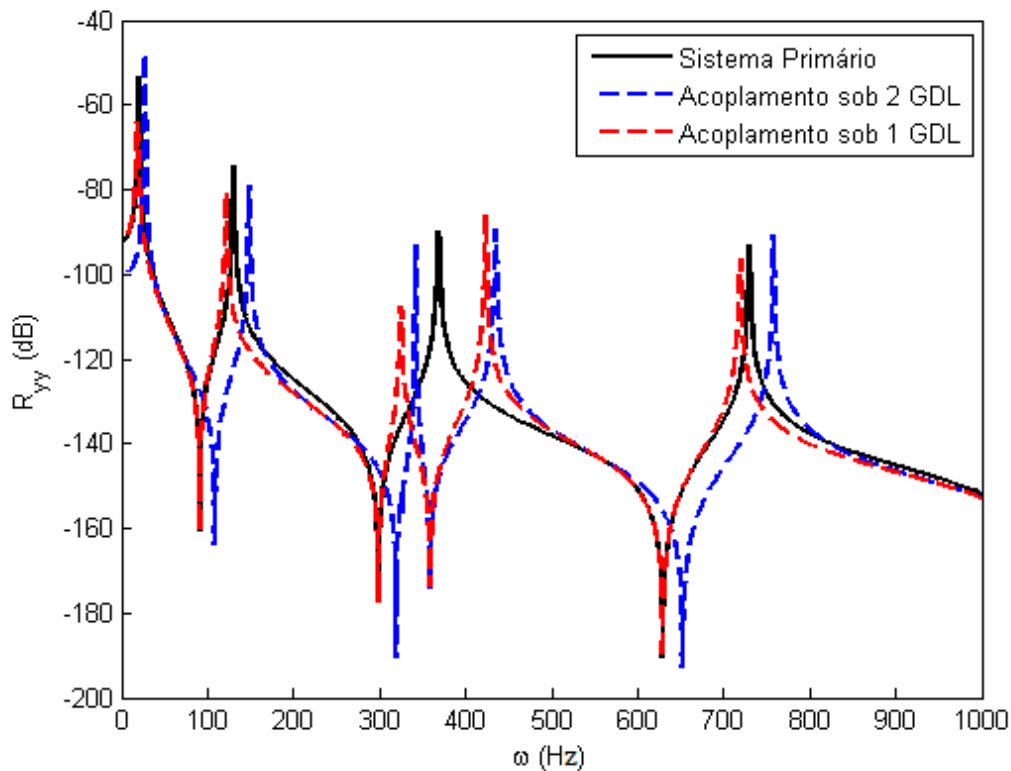


Figura 18 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador tipo anel.

É visível, mesmo para o caso de baixas frequências, que a consideração de acoplamento sob 1 grau de liberdade não retrata com exatidão o que ocorre no sistema composto.

3.3 Neutralizadores Viscoelásticos

A utilização de materiais viscoelásticos na confecção de neutralizadores de vibrações traz consigo a introdução de amortecimento no dispositivo, devido às propriedades particulares destes materiais, como se observa no seu módulo complexo de elasticidade, dado por

$$E^*(\Omega, \theta) = E_r(\Omega, \theta) + iE_i(\Omega, \theta) = E_r(\Omega, \theta)[1 + i\eta_E(\Omega, \theta)], \quad (15)$$

onde E_r representa o módulo real de elasticidade, responsável pelo armazenamento de energia elástica, E_i o módulo imaginário, responsável pela dissipação de energia, η_E a razão entre E_i e E_r , denominada fator de perda, e Ω e θ indicam a dependência destas propriedades da frequência e da temperatura, respectivamente.

A existência de amortecimento torna a matriz de amortecimento não nula, acoplando ainda mais os graus de liberdade existentes na conexão entre os sistemas primário e auxiliar. Para análise do efeito da inserção de amortecimento no dispositivo, são reutilizadas as geometrias dos exemplos anteriores.

Neutralizador massa-mola amortecido

A resposta para o neutralizador tipo massa-mola, descrito na seção anterior, agora utilizando um material com módulo de elasticidade complexo, é dada na Fig. (19). O material viscoelástico empregado utiliza as mesmas propriedades materiais da Tabela 2, com a consideração do fator de perda como sendo $\eta = 0,4$.

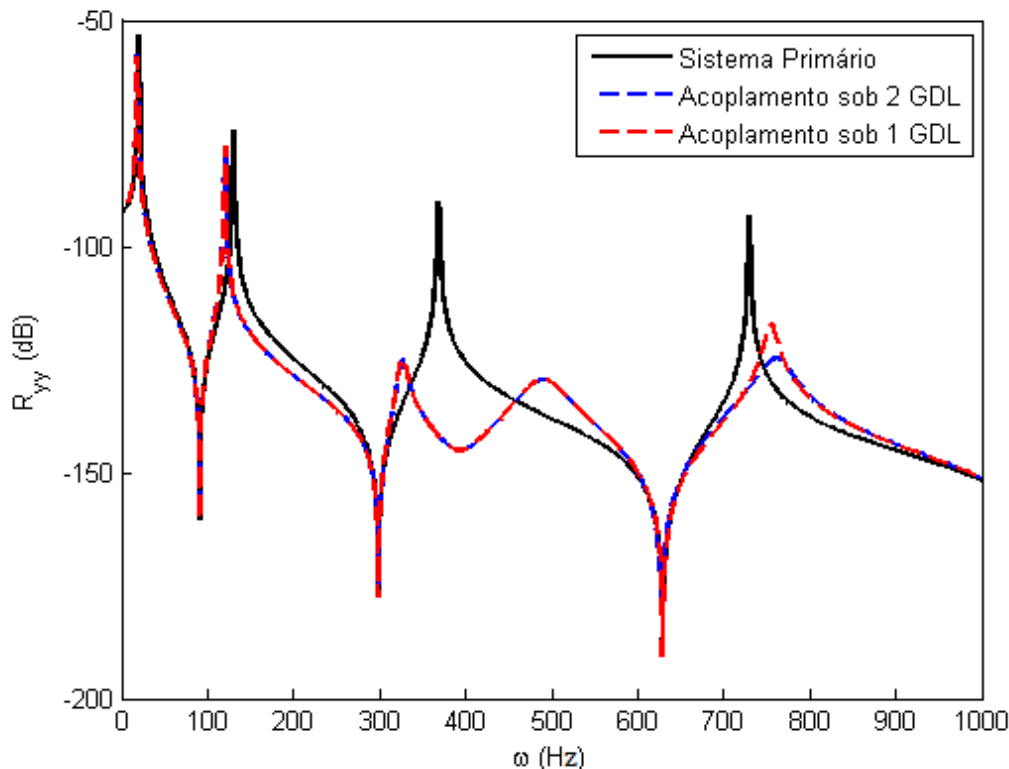


Figura 19 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador tipo massa-mola amortecido.

Observa-se que, com a adição do amortecimento ao neutralizador, mesmo com este amortecimento proporcionando um acoplamento ainda maior dos graus de liberdade, o efeito de redução dos picos de ressonância aproxima ainda mais a resposta (em sistemas simétricos e com pequeno momento de inércia rotacional) para a consideração de acoplamentos sob 1 GDL do caso real. Isso ocorre mesmo para os casos críticos, onde as frequências torcionais do neutralizador coincidem com alguma frequência natural do sistema primário.

Neutralizador tipo “T” amortecido

A resposta para o neutralizador tipo “T” amortecido é mostrada na Fig. (20).

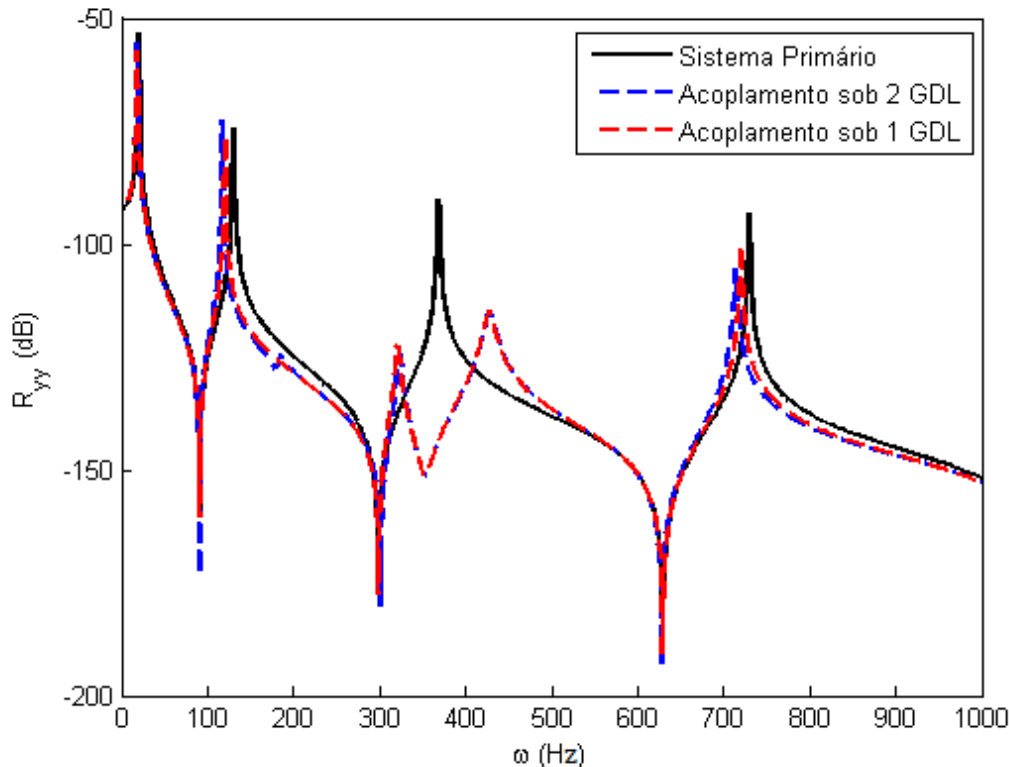


Figura 20 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador tipo “T” amortecido.

Nota-se que, sem grande momento de inércia rotacional, a diferença entre o modelo considerando 2GDL no acoplamento e o considerando 1 GDL é reduzida com a introdução de amortecimento, mesmo para os casos críticos, onde as frequências rotacionais do neutralizador coincidem com alguma frequência natural do sistema primário.

Neutralizador tipo “L” amortecido

Utiliza-se a mesma geometria do neutralizador tipo “L” anteriormente tratado, porém com a consideração da existência de amortecimento material. Para este tipo de neutralizador, a resposta correspondente é exposta na Fig. (21).

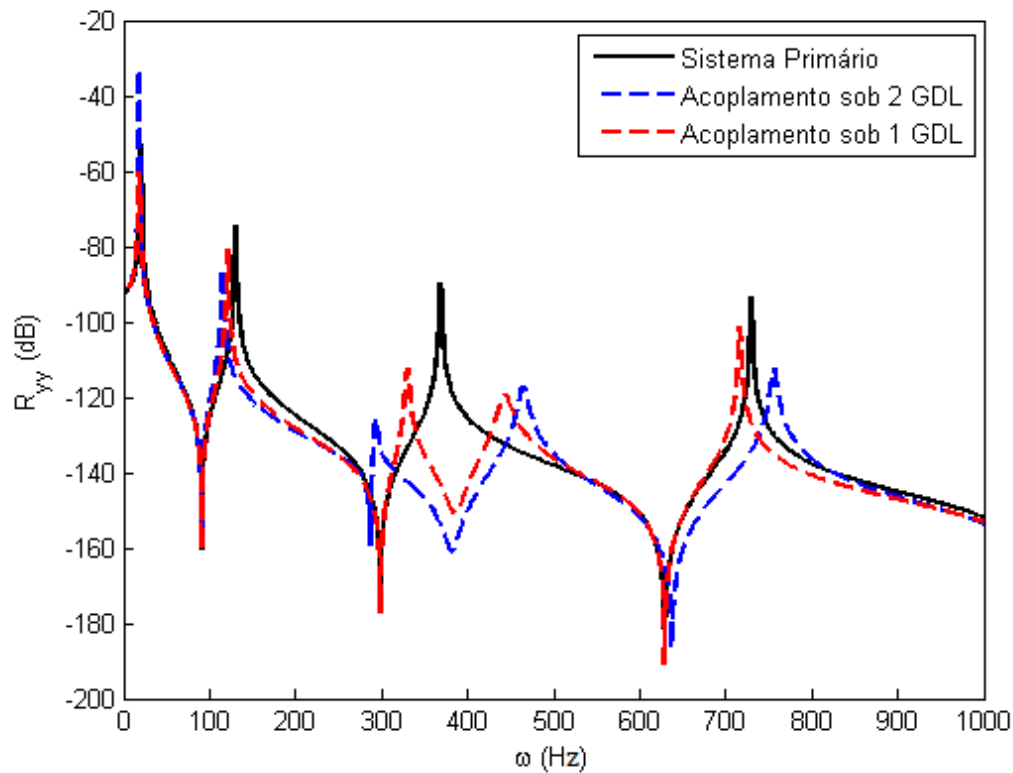


Figura 21 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador tipo “L” amortecido.

Embora para os casos anteriores a diferença entre as curvas seja reduzida pela inserção de amortecimento no sistema, para este caso, onde há um acoplamento entre os graus de liberdade no neutralizador, a resposta para um acoplamento sob 1 GDL ainda difere de forma significativa da resposta real do sistema composto.

Neutralizador tipo anel amortecido

Para o neutralizador tipo anel, o amortecimento é introduzido no material de ligação entre a massa e o núcleo central. As curvas de receptâncias correspondentes são mostradas na Fig. (22).

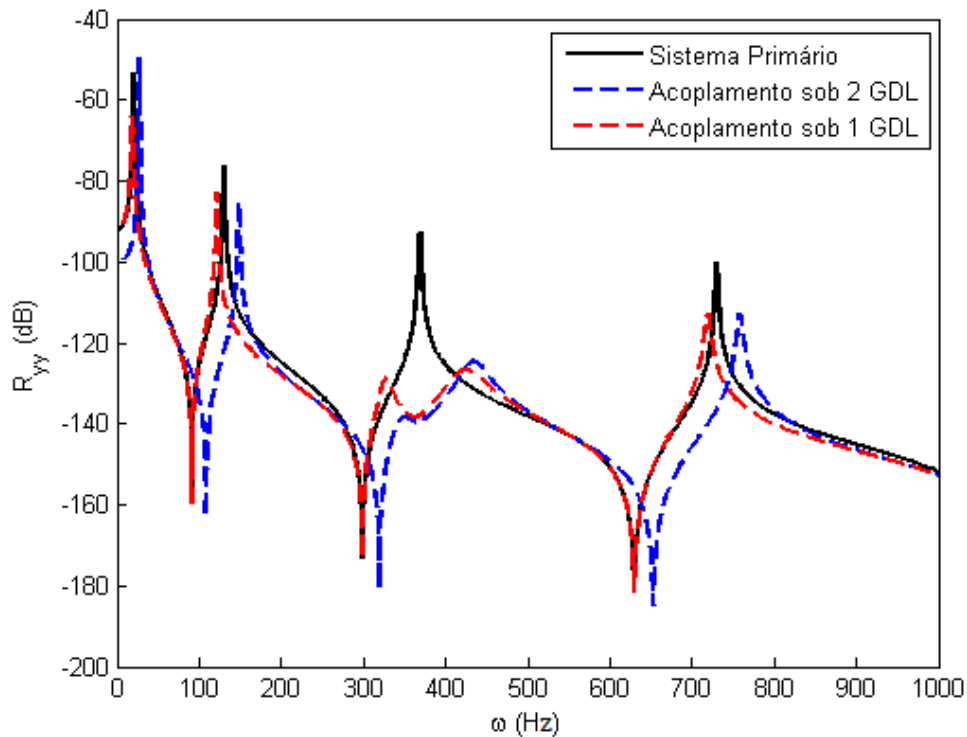


Figura 22 – Curvas de receptância para o sistema composto com neutralizador tipo anel amortecido.

Embora, para este caso, a diferença entre as curvas diminua com a introdução do amortecimento, a consideração de acoplamento sob 1 grau de liberdade continua apresentando diferenças significativas.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi realizado um estudo numérico sobre o efeito da negligência de graus de liberdade do acoplamento de um neutralizador, na resposta de um sistema composto. Para tanto, foram consideradas diversas geometrias de neutralizadores, aplicados no controle de uma viga engastada-livre. Foi utilizada uma metodologia de projeto que trabalha apenas com as curvas de função resposta em frequência dos sistemas envolvidos, modelados independentemente, considerando acoplamento sob um e dois graus de liberdade entre esses.

Mostrou-se, para algumas geometrias, que as simplificações de 1 grau de liberdade assumidas resultam em respostas que destoam dos resultados do sistema real. Isto se torna ainda mais evidente para dispositivos com grande momento de inércia de massa, com acoplamento entre os graus de liberdade e, especialmente, quando as frequências naturais destes coincidem entre si ou com os picos de ressonância do sistema primário.

Mostrou-se também que, mesmo que os graus de liberdade do neutralizador não estejam acoplados, o movimento do sistema primário faz com que o sistema real apresente uma resposta combinada de termos de rotação e de translação. Embora a introdução de amortecimento no neutralizador ocasione um acoplamento extra dos graus de liberdade, ela acaba, em alguns casos, por reduzir a diferença entre os casos analisados.

Por fim, conclui-se que a desconsideração da existência de mais de um grau de liberdade no acoplamento pode, em certos casos, gerar resultados que não são exatamente aqueles encontrados no sistema composto. Nesses casos, maior eficácia poderá ser alcançada no controle de vibração por neutralizadores dinâmicos caso sua ação seja descrita com maior exatidão.

REFERÊNCIAS

- Bavastri, C. A., 1997. *Redução de Vibrações de Banda Larga em Estruturas Complexas por Neutralizadores Viscoelásticos*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil.
- Bavastri, C. A., Doubrawa Filho, F. J., Espíndola, J. J., Lopes, E. M. O., Venâncio, H. W. , 2007. Modelo Geral de Neutralizadores Dinâmicos para Controle Passivo de Vibrações e Ruído: Parâmetros Equivalentes Generalizados. CMNE/CILAMCE, Porto, Portugal.
- Brandon, J. A., 1990. *Strategies for Structural Dynamic Modification*. Research Studies Press.
- Den Hartog, J. P., 1956. *Mechanical Vibrations*. McGraw-Hill Book Company.
- Lopes, E. M. O., 1998. *On the Experimental Response Reanalysis of Structures with Elastomeric Materials*. Thesis (PhD) – University of Wales Cardiff, Cardiff.