

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE ENERGIA A PARTIR DO VIV

Tiago de Melo¹, Jhon Nero Vaz Goulart², André Murilo de Almeida Pinto³

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Distrito Federal, Brasil.

¹Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos (PPMEC) - UnB. Brasil. e-mail: tiago.melomec@gmail.com

²Grupo de Mecânica Experimental e Computacional– Universidade de Brasília – UnB Faculdade de Gama, Brasília - DF, Brasil. e-mail: jvazgoulart@gmail.com

³Laboratório de Sistemas e Controle, Universidade de Brasília - UnB, Faculdade de Gama, Brasília-DF, Brasil. e-mail: andremurilo@unb.br

Resumo

O objetivo deste artigo é investigar as características e potencialidades das interações fluido-mecânica na conversão de energia, focando no fenômeno de vibrações induzidas por vórtices (VIV), em um cilindro rígido montado em apoio elástico com um grau de liberdade. Nesse sentido, uma análise de modelos físicos do fenômeno e sua sensibilidade aos parâmetros do sistema são estudados como uma alternativa para geração de energia. Os principais resultados desta análise revelam que os sistemas de conversão baseados no VIV são caracterizados por uma baixa eficiência de conversão de energia, consideravelmente abaixo das turbinas eólicas tradicionais. No entanto, também foi destacado como esse fenômeno pode ser estudado em baixas velocidades de escoamento do fluido. Observou-se que a resposta de amplitude máxima e a eficiência de conversão acontecem com a mesma velocidade reduzida, em torno de 5,5. Pode ser notado, quanto o menor for o amortecimento, o sistema experimenta uma maior resposta de amplitude, porém a eficiência de conversão é baixa.

Palavras-chave: Vibrações induzidas por vórtice, VIV, Modelos Fenomenológicos, Conversão de energia.

Abstract

The aim of this article is to investigate the characteristics and potentialities of fluid-mechanical interactions in energy conversion, focusing on the phenomenon of vortex-induced vibrations (VIV), in a rigid cylinder mounted on elastic support with one degree of freedom. In this sense, an analysis of physical models of the phenomenon and its sensitivity to system parameters are studied as an alternative for energy generation. The main results of this analysis reveal that VIV-based conversion systems are characterized by a low energy conversion efficiency, considerably below traditional wind turbines. However, it was also highlighted how this phenomenon can be studied at low fluid flow velocities. It was observed that the maximum amplitude response and the conversion efficiency occur with the same reduced speed, around 5.5. It can be noted that the lower the damping, the system experiences a higher amplitude response, but the conversion efficiency is low.

Keywords: Vortex-induced vibrations, VIV, Phenomenological Models, Energy Conversion.

1. Introdução

A eficiência na geração de energias renováveis cresceu significativamente nos últimos anos, com o objetivo de diminuir os impactos ambientais e suprir a demanda energética [1]. Atualmente muitos pontos sobre viabilidade energética são debatidos pelo mundo, com o objetivo de identificar as fontes renováveis que supram essas demandas, de forma menos impactante, assim melhorando a qualidade de vida da sociedade [2].

A matriz de energia elétrica brasileira é uma das mais limpas, mas também uma das mais caras do mundo. Alguns fatores operacionais e climáticos como a sazonalidade das chuvas e as baixas pluviométricas dos últimos anos são parte do problema [3]. A capacidade instalada da fonte hidráulica na matriz energética caiu de 14,7% para 12,4% entre 2011 e 2019, apesar da contínua expansão absoluta em termos de novas usinas e da capacidade geradora. Isso se deve ao crescimento das demais fontes renováveis (eólica, solar e bioenergética), que saltaram de 29,4% para 33,8% no mesmo período [4].

No caso do Brasil, o aproveitamento dos recursos eólicos para geração elétrica também é um fenômeno recente, caracterizado por um boom no final das últimas décadas e que ampliou a geração eólica anual de 663 GWh em 2007 para aproximadamente 42,4% TWh em 2017 [5].

Novos conceitos de geradores de energia eólica foram criados, baseados em vários mecanismos físicos, com o objetivo de obter uma alternativa mais viável de integrar os dispositivos a diferentes paisagens e áreas urbanas. Como por exemplo, o conceito de turbina *O-wind* proposto pelos Ingleses Yaseen Noorani e Nicolas Orellana em 2018, a ideia dos pesquisadores é que a turbina portátil possa ser eficiente em cidades onde o vento é multidirecional e imprevisível. Outra proposta é o modelo apresentado pela empresa *Vortex Bladeless SL* em 2019, que é baseado em um fenômeno de aeroelasticidade chamado vibrações induzidas por vórtices, que aproveita a energia eólica do fenômeno. Basicamente, a tecnologia *bladeless* consiste em um cilindro fixado verticalmente por uma haste elástica, onde o cilindro oscila em uma faixa de velocidade de escoamento do vento, que então gera eletricidade por meio de um sistema de alternador, formado por bobinas e ímãs.

Para cada aplicação na geração de energia eólica é necessário identificar o método mais adequado para coletar essa energia, com base na produção necessária, espaço disponível e custos. Neste sentido, este trabalho busca explorar o potencial do fenômeno de vibração induzida por vórtices, VIV, como principal mecanismo de geração de energia eólica, compreendendo os parâmetros envolvidos na relação entre o VIV e a eficiência na geração.

A força aerodinâmica e a conversão de energia são estudadas por meio de três modelos fenomenológicos descritos por [6], [7] e [8] todos os modelos estudados são derivados do modelo proposto por [9], onde as equações de movimento desenvolvidas são numericamente integradas e resolvidas por meio do aplicativo computacional *Matlab*[®], com o intuito de analisar a influência dos parâmetros afetam na conversão de energia do sistema. Com base no estudo paramétrico, é possível verificar como a amplitude e a eficiência de conversão de energia do sistema são afetadas por dois tipos de massa reduzida (m^*) e quatro diferentes valores de razão de amortecimento (ζ), para um cilindro com diâmetro (D) de 25 mm.

2. Modelos Matemáticos VIV

Os problemas de interação fluido-estrutura são por definição sistemas acoplados. No caso do VIV, fluido e estrutura estão acoplados pela força que o fluido exerce na estrutura. Essa força causa a vibração da estrutura, que como consequência pela mudança de orientação e posição da estrutura em relação ao fluido, altera a força exercida pelo fluido.

Conforme [10], matematicamente, os sistemas acoplados representam problemas de duas ou mais

equações diferenciais, no qual uma ou todas as equações governantes envolvem mais de uma ou todas as incógnitas. Sendo assim, o sistema de equações acopladas tem que ser resolvido simultaneamente. Fisicamente, representam situações onde dois ou mais sistemas físicos interagem, ou seja, uma ação de um elemento do sistema provoca uma reação no sistema que, por sua vez, modifica a maneira como os elementos interagem.

Atualmente, estudos de previsão do comportamento de estruturas em VIV são feitos por uma extensa gama de abordagens e modelos matemáticos. Entre os principais estão os modelos fenomenológicos ou semi-empíricos que são os mais usados por fornecerem resultados relativamente satisfatórios e consumirem pouco tempo computacional.

Os modelos fenomenológicos normalmente possuem uma ou mais variáveis que representam a dinâmica da esteira de vórtices, onde buscamos satisfazer equações autolimitadas e auto-excitadas com a presença de parâmetros obtidos experimentalmente, como por exemplo, as equações de osciladores de Van der Pol para representar o fluido e equações de osciladores lineares para a estrutura [11]. Em geral, são modelos que possuem como sua maior vantagem a obtenção de informações importantes do VIV ao custo de recurso computacional reduzido.

Um dos primeiros modelos matemáticos é apresentado por [12], no qual o desenvolve um sistema não linear de equações que descreve a resposta de um cilindro rígido com um grau de liberdade. Posteriormente, surgiram outros modelos com o intuito de recuperar cada vez mais os aspectos do fenômeno de VIV, em problemas envolvendo cilindros rígidos montados em base elástica com um grau de liberdade. Este texto destaca os modelos de [6], [7], e [8] todos os modelos se utilizam como base de estudos o modelo desenvolvido por [9].

2.1. Modelo de Ogink e Metrikine (2010)

Ogink e Metrikine [8], buscam melhorar a aderência da curva de resposta da amplitude de oscilação, apresentada em [9], com os resultados experimentais, atentando-se em descrever corretamente tanto o intervalo de velocidade reduzida na região de *lock-in* quanto a amplitude de resposta do cilindro.

A formulação inicia-se com as mesmas equações do modelo de [9], uma diferença entre os modelos reside no termo C_{vY} do carregamento ao qual a estrutura está submetida. [8] propõem manter o coeficiente de arrasto dependente da velocidade transversal do cilindro e o ângulo de ataque (β) sem qualquer aproximação como, por exemplo, aquela feita em [9]. Dessa forma, o valor de C_{vY} é dado pela Equação (1).

$$C_{vY} = \left(\frac{U}{U_\infty} C_L - \frac{U}{U_\infty^2} \frac{dY}{dt} C_D \right) \quad (1)$$

onde C_D Coeficiente de arrasto, C_L Coeficiente de sustentação, U é Velocidade do fluido, relativa ao cilindro e U_∞ é Velocidade do escoamento incidente. A partir do termo C_{VY} obtém-se a equação da estrutura principal, na forma dimensional, Equação (2).

$$(M + m_a) \frac{d^2 Y}{dt^2} + c_y \frac{dY}{dt} + kY = \frac{1}{2} \rho D L U_\infty \sqrt{U_\infty^2 + \left(\frac{dY}{dx} \right)^2} \left(C_L - \frac{1}{U_\infty} \frac{dY}{dt} C_D \right) \quad (2)$$

M é a massa do cilindro, m_a é a massa adicional potencial, k_y é a rigidez da estrutura na direção transversal ao escoamento incidente, Y é o deslocamento transversal do cilindro c_y é a constante de amortecimento estrutural na direção transversal ao escoamento, ρ a densidade do fluido e D o diâmetro do cilindro. A Equação (3) e a Equação (4), representam o modelo fenomenológico de [8].

$$\ddot{y} + 2\zeta_y \dot{y} + y = \frac{V_R^2}{2\pi(C_a + m^*)} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{V_R} \dot{y} \right)^2} \left(\hat{q}_y^0 q_y - \frac{2\pi}{V_R} C_D \dot{y} \right) \quad (3)$$

$$\ddot{q}_y + \varepsilon_y St V_R (q_y^2 - 1) \dot{q}_y + St^2 V_R^2 q_y = A_y \ddot{y} \quad (4)$$

onde y é o deslocamento transversal do cilindro normalizado pelo seu diâmetro, ζ_y é a taxa de amortecimento estrutural na direção transversal ao escoamento, V_R a Velocidade reduzida, \hat{q}_y é a amplitude do ciclo-limite da Equação de van der Pol homogênea na direção ortogonal ao escoamento, m^* é o parâmetro de massa reduzida, considerado como a relação entre a massa estrutural oscilante e a massa de fluido deslocada pelo corpo C_L^0 é o coeficiente de sustentação obtido para cilindro fixo, ε_y é o coeficiente de calibração do oscilador de van der Pol na direção transversal, St é o número de Strouhal, A_y Amplitude de resposta característica de oscilação do cilindro na direção transversal ao escoamento.

2.2. Modelo de Fortaleza (2011)

No trabalho de [7], dois novos modelos de acoplamentos são propostos para estudar o fenômeno de VIV em um cilindro rígido. Os modelos matemáticos de deslocamento e velocidade apresentados em [9], foram reformulados neste trabalho, onde [7] propõe uma adaptação aos modelos de deslocamento e velocidade através de uma análise fasorial. A Equação (5) e a Equação (6), apresentadas no trabalho de [8], são adimensionais, bem como os seus termos de acoplamento. Para este estudo será

avaliado o modelo de deslocamento, proposto pelo autor.

$$\ddot{y} + y + \left(\frac{\gamma \omega_f}{\mu_i} + 2\zeta \right) \dot{y} = F \quad (5)$$

$$\ddot{q} + \varepsilon \omega_f (q^2 - 1) \dot{q} + \omega_f^2 q = G \quad (6)$$

2.2.1. MODELO DE DESLOCAMENTO

O modelo de deslocamento considera que a força de sustentação da estrutura F é inversamente proporcional a variável do modelo do fluido q . Esse modelo também considera que o termo de acoplamento G é proporcional ao deslocamento da estrutura y . Logo as forças de excitação do sistema, F e G , são dadas pela Equação (7) e pela Equação (8), onde ω_f é a frequência de emissão de vórtices.

$$G = \omega_f A_y \quad (7)$$

$$F = -\omega_f^2 M q \quad (8)$$

O coeficiente de acoplamento A , relacionado ao modelo fenomenológico da Equação (7) é simplesmente um valor numérico e M é calculado com a seguinte Equação (9) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

$$M = \frac{C_L}{4\pi^2 St^2 \mu} \quad (9)$$

2.3. Modelo de Srinivasan et al. (2018)

Assim como os modelos descritos nas Subseções anteriores, [6], também utilizam a equação de van der pol para representar o coeficiente de sustentação e a parcela oscilatória do coeficiente de arrasto da esteira de vórtices. Sua formulação adimensional é expressa pela Equação 10. Este modelo, que originalmente pretendia reproduzir a dinâmica de um sistema com dois graus de liberdade de VIVs, também fornece bons resultados quando restritos a um único grau de liberdade.

$$\begin{cases} \ddot{Y} + \left(2\zeta\delta + \frac{\gamma}{m} \right) \dot{Y} + \delta^2 Y = Mq \\ \ddot{q} + \varepsilon (q^2 - 1) \dot{q} + q = A\ddot{Y} \end{cases} \quad (10)$$

Onde os parâmetro γ e M são determinados pela Equação 11 e pela Equação 12.

$$\gamma = \frac{C_D}{4\pi St} \sqrt{1 + (2\pi St \dot{Y})^2} \quad (11)$$

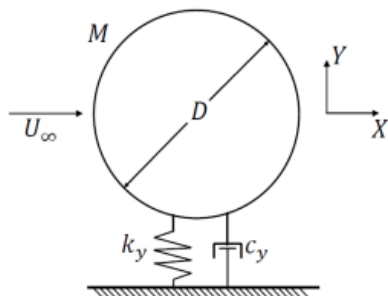
$$M = \frac{C_L}{2} \frac{1}{8\pi^2 St^2 m^2} \sqrt{1 + (2\pi St \dot{Y})^2} \quad (12)$$

O modelo prevê alguns aspectos importantes do VIV como, amplitudes do deslocamento da estrutura e também a faixa de sincronização em relação a velocidade reduzida, para diferentes razões de massa. É importante notar que a fenomenologia dos VIVs dependem de uma longa lista de parâmetros que correlacionam o fluido e a estrutura, e que a partir do regime do escoamento, a viscosidade do fluido, a massa da estrutura e o amortecimento, possuem forte efeito na resposta do sistema e muitas vezes estão inter-relacionados.

3. Metodologia Numérica

A integração numérica no domínio do tempo das equações diferenciais é feita pelo método de *Runge-Kutta* por meio da função *ode45* existente no ambiente *MATLAB*®. Uma pequena perturbação inicial foi introduzida nas velocidades iniciais das variáveis de esteira para garantir que o sistema desenvolvesse completamente sua dinâmica dentro do intervalo de integração. Com isso, as condições iniciais não nulas adotadas para o problema são na condição VIV-1GL. Figura 1.

Figura 1 - Cilindro rígido montado em apoio elástico com um grau de liberdade



Fonte: Autor

Após verificar a boa aderência entre os resultados experimentais e aqueles oriundos dos modelos fenomenológicos empregados nas formulações analíticas desta pesquisa, serão realizados os estudos da eficiência de conversão de energia. O cilindro estava livre para vibrar transversalmente ao escoamento com diferentes valores de razão de massa e razão de amortecimento, conforme apresenta a Tabela 1, para criar diferentes configurações das seções,

Tabela 1 – Valores dos parâmetros de VIV

Parâmetro	Valor
Diâmetro (D)	25 mm
Struhal (St)	0,2
Coefficiente de Arrasto (C _D)	1,5
Coefficiente de Sustentação (C _L)	0,5
Razão de Massa (m*)	2 e 40
Razão de Amortecimento (ζ)	0,005, 0,001, 0,050 e 0,100
A _y	12
ε _y	0,005

Nas simulações as condições de deslocamento (Y) obtidas ao final de cada passo de velocidade reduzida, serão definidas como o valor inicial para determinar a eficiência. Os principais resultados da análise do modelo adimensional de VIV consistem na avaliação da resposta de semi-amplitude normalizada $Y = y/D$, que vem diretamente do valor numérico da resolução das equações acopladas e posteriormente a eficiência de conversão calculada a partir da Equação 13, conforme [13] sugerem.

$$\eta = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T c \dot{y}^2 dt}{\frac{1}{2} \rho U^3 (2y + D)L} \quad (13)$$

Substituindo os parâmetros adimensionais de VIV, a Equação 13 pode ser reescrita conforme apresenta a Equação 14, sendo que para cada passo de velocidade reduzida a eficiência de conversão será calculada.

$$\eta = 4(2\pi)^3 \frac{m_i \zeta}{U_i^3 \Gamma^{*2}} \frac{1}{(2Y + 1)} \frac{1}{\Gamma_0} \int_0^{\Gamma} \dot{Y}^2 d\tau \quad (14)$$

Descrita a metodologia de análise, a próxima seção é dedicada à apresentação dos resultados e correspondentes discussões. Tais discussões contemplam não somente as curvas de amplitude característica de oscilação do cilindro como funções da velocidade reduzida, mas também será discutido o aproveitamento desta energia, apresentado como eficiência de conversão.

4. Resultados e Discussões

Nesta seção de resultados e discussões, é feita a comparação entre as curvas de amplitude característica de oscilação do cilindro obtidas a partir

dos modelos fenomenológicos e aquelas oriundas dos dados experimentais da literatura para casos de VIV-1GL. Para gerá-las, o sistema de equações é resolvido para diferentes valores de Velocidade Reduzida (V_r) e o valor máximo de amplitude de vibração (Y) é avaliado. Por fim, a curva é produzida sobrepondo todos os valores calculados (V_r e Y). Essas curvas permitem discutir a representatividade dos modelos matemáticos para as condições nas quais o cilindro é sujeito ao carregamento devido ao VIV.

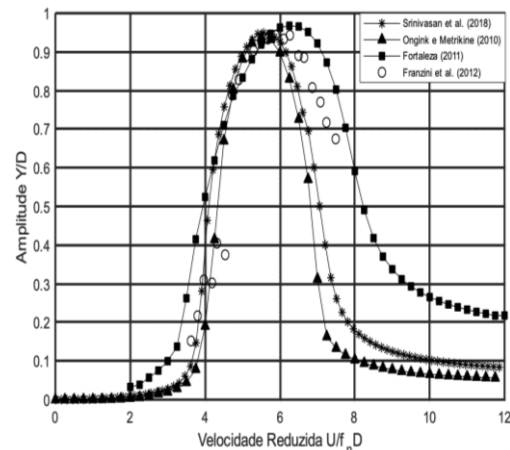
4.1. Validação Numérica

O fenômeno chamado *lock-in*, acontece quando ocorre a aproximação da frequência de excitação da frequência natural da estrutura, resultando em um aumento da amplitude de vibração. Dessa forma, é interessante fazer essa análise através da velocidade reduzida.

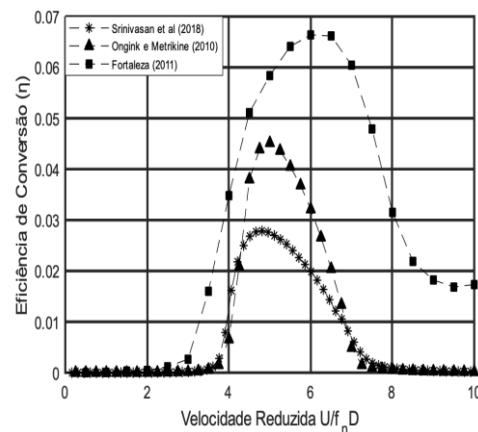
Com o intuito de mostrar uma validação entre os resultados obtidos via simulação dos modelos fenomenológicos, as curvas de amplitude foram comparadas com os dados experimentais de [14], onde a Figura 2 ilustra a amplitude de oscilação característica do cilindro em função da velocidade reduzida. A Figura 2 (a) permite comparar as curvas de resposta obtidas por meio dos modelos fenomenológicos apresentados e os resultados da investigação experimental apresentados por [14]. Nota-se uma maior aderência entre os modelos fenomenológicos de [5] e [7] com os dados experimentais, uma vez que tanto as amplitudes características de oscilação como o intervalo do *lock-in* são melhores recuperados.

Pode-se notar que o modelo de [7] apesar de prever a tendência da curva de amplitude este modelo apresentou uma divergência em relação aos dados experimentais, apresentando um Y na $V_r = 6,0$, esta diferença pode ser atribuída aos parâmetros de ε e A que impactam neste modelo. Com o aumento de ε , a região de *lock-in* tem sua extensão e as amplitudes de vibração reduzidas, embora a sincronização comece sempre pelo mesmo valor de V_r , pois conforme Paes (2018), a variação de ε modifica a extensão da região de *lock-in*. Dessa forma, percebe-se que os modelos são capazes de representar com fidelidade a realidade. A Figura 2 (b) apresenta os valores de eficiência de conversão da energia para os dados experimentais de [14], aplicando a análise através da Equação 14, como pode ser visto o valor máximo de eficiência é apresentado pelo modelo de [7] cerca de 6,5 % para uma V_r de 6, já o modelo de [6] apresentou o menor valor de conversão cerca de 2,8 %. Após verificar a resposta entre os resultados experimentais da literatura e aqueles oriundos dos modelos fenomenológicos empregados nas formulações analíticas desta pesquisa, iniciam-se os estudos paramétricos a fim de validar avaliar os modelos estudados.

Figura 2 - Comparação dos modelos fenomenológicos com os resultados experimentais de [14].



(a)



(b)

4.2. Resultados Simulação Numérica

As Figura 3, Figura 4 e Figura 5 apresentam os resultados das simulações numéricas dos modelos estudados, onde foram avaliados os parâmetros apresentados na Tabela 1, as curvas com as variações dos parâmetros de m^* e ζ são avaliados para cada modelo para que sua comparação tenha fundamento.

A Figura 3 mostra os resultados da simulação através do modelo de [6], é possível observar que os quatro valores de amortecimento apresentam curvas de amplitude de vibração com padrões similares, porém pelos dados avaliados, pode-se afirmar que nestas condições, os sistemas de menores razões mássicas e razões de amortecimento, entre os testados, apresentaram amplitudes máximas de vibrações maiores.

Pode-se observar que a resposta apresenta um pico de oscilação concentrado perto da região de *lock-in*. O valor máximo de amplitude de oscilação ocorre próximo da velocidade reduzida de 5,5. Como pode ser observado na Figura 3 a resposta típica de VIV ocorre na região de velocidade reduzida 5,0, isso ocorre devido ao número de Strouhal. Pode-se

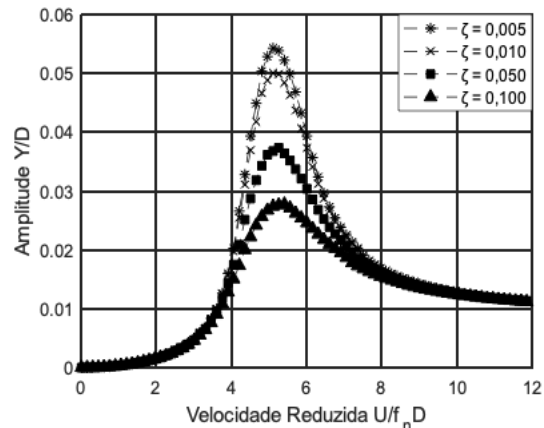
perceber também que a resposta apresentada por este modelo, apresenta uma região de *lock-in* estreita e concentrada em um ponto, principalmente para o sistema de massa igual a 40. Por fim, cabe destacar a principal contribuição dessa modelagem foi a amplitude máxima da resposta de 0,055 para m^* de 2,0 e amortecimento de 0,005. Assim, com uma modelagem simples e rápida, consegue-se ter uma noção de ordem de amplitude da vibração.

Na Figura 3 (b), é apresentado os resultados dos valores máximos da eficiência de conversão para cada caso estudado. Como pode ser visto o valor máximo da eficiência muda significativamente de um caso para outro, correlacionado com os parâmetros de massa e amortecimento. No entanto, uma razão de massa considerada pequena determina uma inclinação mais moderada na tendência de eficiência em função da razão de amortecimento, enquanto valores mais altos de m^* são caracterizados por uma faixa mais curta de conversão de energia. O melhor caso avaliado para os valores de eficiência foi o caso, com razão de amortecimento em torno de 0,005 e massa de 2,0, apresenta uma eficiência máxima para os casos estudados, cerca de 0,13 %, o que é significativamente baixo.

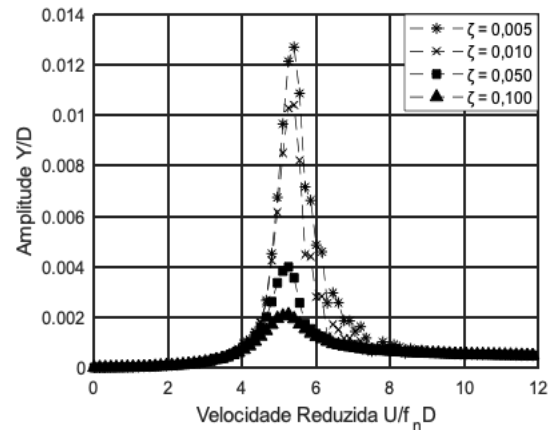
Os resultados obtidos a partir do modelo de [6] estão ilustrados nas 5 e 6, pode-se perceber uma menor compatibilidade a respeito da curva de amplitudes com os resultados experimentais, o que possivelmente pode ser explicado pelos parâmetros semi-empíricos, ε e A , como referência foram usados os valores propostos por [8], ($\varepsilon = 0,05$ e $A = 12$), o pior resultado apresentado é o caso 1, com um curva de amplitude muito discrepante dos outros resultados, os demais casos seguem a mesma tendência das curvas, modelando a região de *lock-in*. É importante notar que este modelo apresenta maiores amplitudes na condição de sincronização de frequências que o modelo de [5] e consideravelmente uma maior largura de sincronização. Pode ser notado também, que novamente as quatro curvas apresentam padrões similares, porém pelos dados obtidos, pode-se afirmar que nestas condições, que os sistemas de maiores razões mássicas apresentam amplitudes máximas de vibrações menores.

Na Figura 5 e 6 (b), é apresentado os resultados dos valores máximos da eficiência de conversão para cada caso estudado. Como pode ser visto o valor máximo da eficiência não muda significativamente de um caso para outro, com exceção do caso 1. Neste modelo o comportamento da eficiência pode-se observar que em todos os casos, a eficiência de conversão máxima é alcançada quase na mesma velocidade reduzida (em torno de 7).

Figura 3 – Resultados Modelo [5]. a) Amplitudes de vibrações transversais ao escoamento. b) Resposta de eficiência de conversão de Energia. Para uma razão de massa de 2,0.

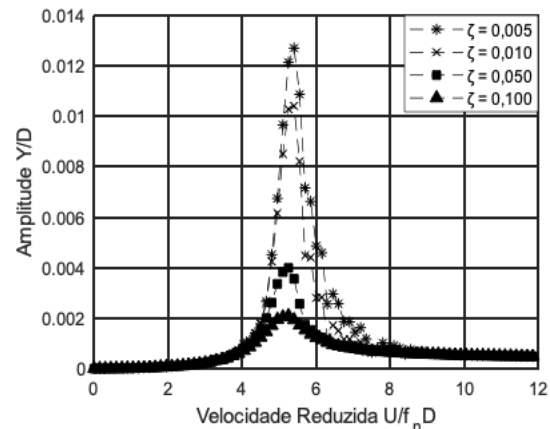


(a)



(b)

Figura 4 – Resultados Modelo [5]. a) Amplitudes de vibrações transversais ao escoamento. b) Resposta de eficiência de conversão de Energia. Para uma razão de massa de 40.



(a)

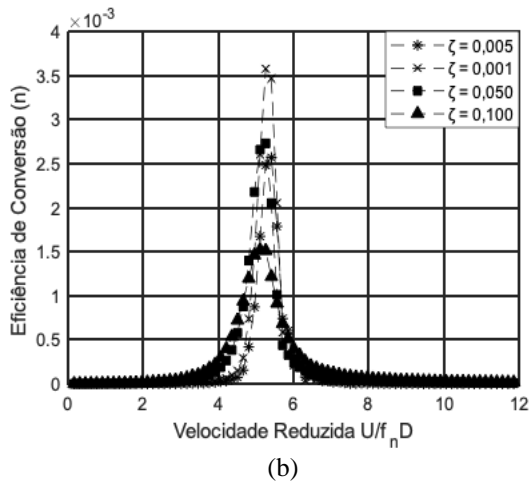
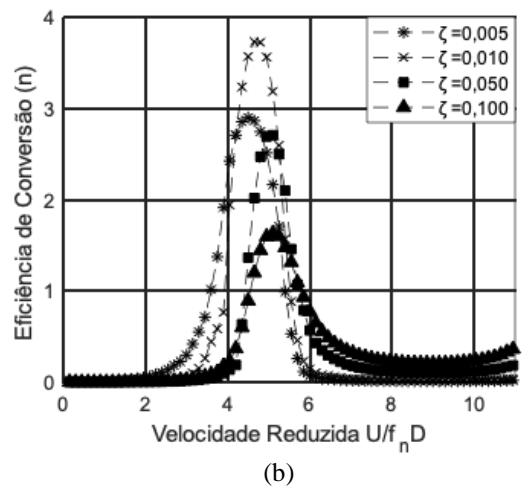
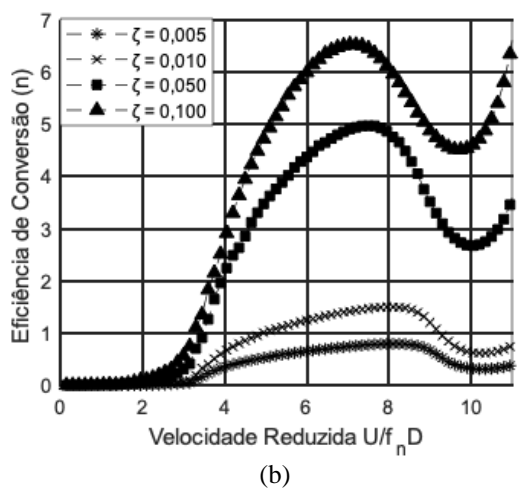
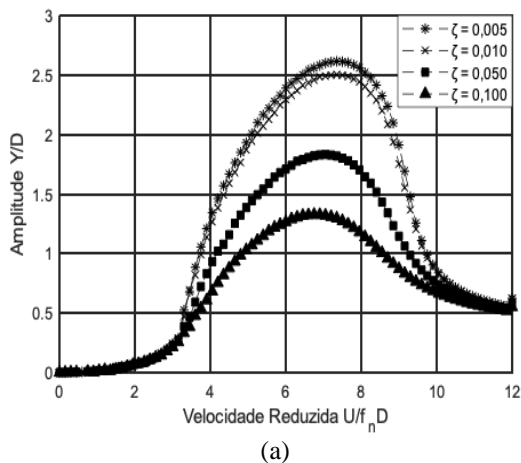
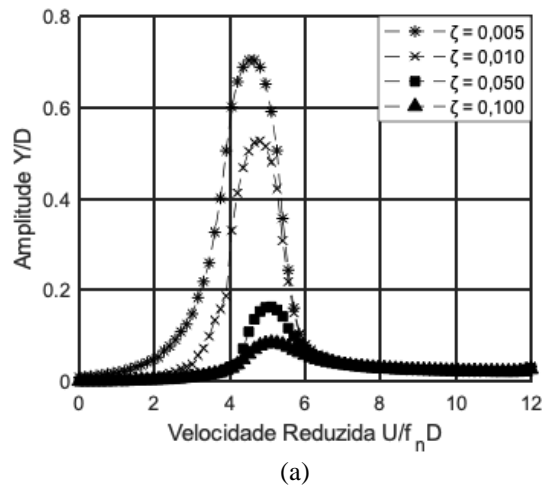


Figura 5 - Resultados Modelo [6]. a) Amplitudes de vibrações transversais ao escoamento. b) Resposta de eficiência de conversão de Energia. Para uma razão de massa de 2.

Figura 6 - Resultados Modelo [6]. a) Amplitudes de vibrações transversais ao escoamento. b) Resposta de eficiência de conversão de Energia. Para uma razão de massa de 40.



As Figuras 7 e 8 apresentam as curvas de amplitude de vibração e as curvas de eficiência de conversão de energia obtidas a partir do modelo proposto por [7], podem ser apontadas a antecipação do início e do fim do *upper branch* nos resultados numéricos. Pode-se notar, ainda, que as amplitudes características de oscilação no *upper branch* são similares para todos os casos estudados. Já a correlação experimental dos resultados obtidos a partir do modelo foi bastante insatisfatória. Embora o modelo tenha previsto de maneira bastante aderente a velocidade reduzida na qual o pico de resposta é observado, esse último valor é próximo a $Y = 1,5$ alcançada quase na mesma velocidade reduzida (em torno de 5,5) para todos os casos, como ocorreu na modelagem de [6]. Na Figura 7 e 8 (b), é apresentado os resultados dos valores máximos da eficiência de conversão para cada caso estudado. Como pode ser visto o valor máximo

da eficiência muda de um caso para outro. Neste modelo o comportamento da eficiência pode-se observar que em todos os casos os resultados são muito elevados em comparação aos demais modelos apresentados, as eficiências de conversão máxima apresentou-se na mesma velocidade reduzida que as amplitudes de vibração. Os casos com menor razão de massa, tiveram uma menor conversão de energia, mostrando como os resultados são afetados por este parâmetro.

De maneira geral, ao modificar-se as propriedades dinâmicas do sistema representado nos modelos fenomenológicos através da alteração dos parâmetros, os mesmos padrões de respostas continuam a serem observados, indicando que o uso de tais modelos para diversos tipos de configurações pode ser valioso.

É importante notar que mesmo que não afete a eficiência máxima, o valor de razão de massa deve ser mantido o menor possível. Como visto a partir dos resultados, uma alta razão de massa produz uma faixa mais curta de velocidade reduzida na qual a conversão é maximizada. Além disso, olhando para as respostas de amplitude relatadas nos resultados para diferentes valores de m^* , é claro que valores mais baixos determinam amplitudes mais altas, isso tem um efeito importante se considerarmos o potencial de geração.

Figura 7 – Resultados Modelo [7]. a) Amplitudes de vibrações transversais ao escoamento. b) Resposta de eficiência de conversão de Energia. Para uma razão de massa de 2,0.

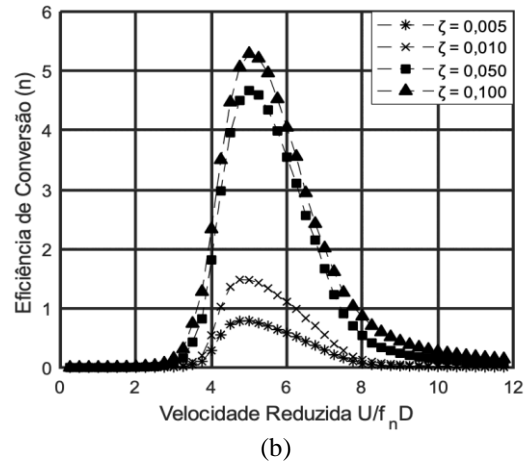
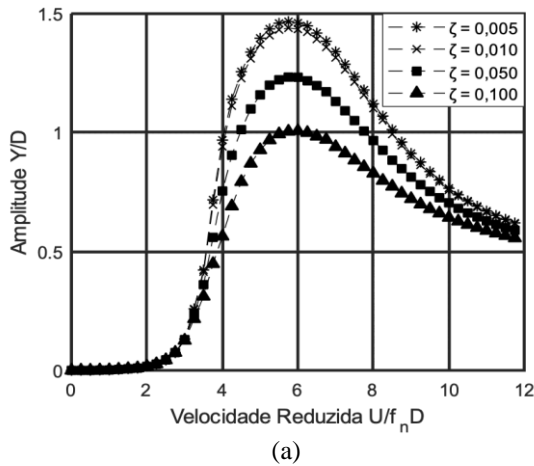
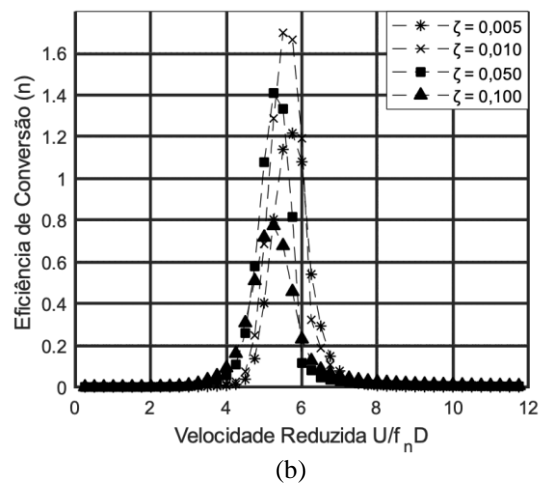
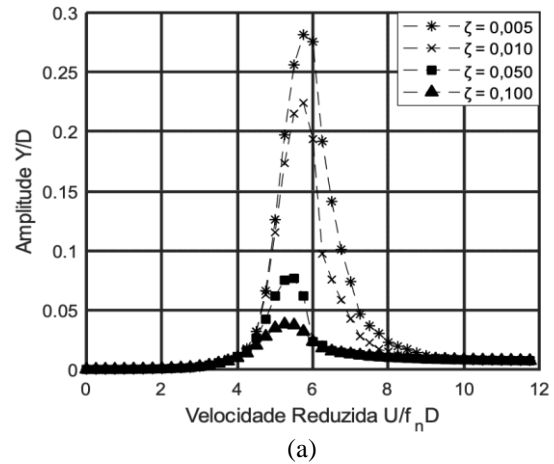


Figura 8 – Resultados Modelo [7]. a) Amplitudes de vibrações transversais ao escoamento. b) Resposta de eficiência de conversão de Energia. Para uma razão de massa de 40.



5. Conclusões

Neste trabalho foi estudado o potencial de sistemas baseados em vibrações induzidas por escoamento, em aplicações de conversão de energia, como um estudo

para futuras aplicações em geração de energia eólica. A análise dos fenômenos foi baseada em modelos matemáticos aplicados na literatura, levando em consideração as hipóteses sobre os quais são construídos. Analisou-se a viabilidade dos três modelos para VIV, onde foi realizada uma tentativa de calibração dos parâmetros para o problema, visto que as variáveis do oscilador carecem de uma relação direta com as teorias de mecânica dos fluidos.

A calibração dos modelos utilizado foram feitas através da comparação da resposta numérica com dados experimentais para a curva de ressonância de um cilindro sujeito a VIVs livre para oscilar com um grau de liberdade. O critério para a calibração, foi tentar reproduzir a região de saída do *lock-in* sem exceder muito a máxima amplitude da curva de ressonância experimental, mantendo os valores obtidos nas medições. Foi verificado que os modelos estudados conseguem reproduzir a região de *lock-in* com uma precisão razoável, mas falha em prever a sua entrada, que parece ocorrer sempre para o mesmo valor de V_r .

Com o intuito de aprofundar o estudo sendo desenvolvido do modelo fenomenológico com parâmetros referenciais, é interessante saber como é o comportamento deste modelo com características de sistema diferentes, isto é, ao variar a razão de massas e amortecimentos do sistema.

A resposta do cilindro e eficiência são afetadas e são funções principalmente dos parâmetros m^* e ζ , bem como o número de Reynolds. As maiores diferenças foram encontradas nas amplitudes máximas dos modelos de [6], [7] e [8] na extensão da região de sincronização de frequências.

No decorrer do trabalho foi constatado que VIV apresentam baixas eficiências de conversão e portanto, não parecem adequados para serem usados para gerar grande quantidade de energia, principalmente se comparado com as turbinas eólicas tradicionais. Por outro lado, verificou-se que possuem características necessárias (simplicidade de projeto, pequenos volumes e baixo custo) para uma aplicação na geração de pequenas potências, utilizadas para alimentar sensores isolados e dispositivos eletrônicos, por exemplo.

6. Referencias

- [1] VILLARREAL, David Jesús YAÑEZ. An electrical power generator and an electrical power generation method. 2020.
- [2] Rosa Junior, A. F. D., Silva, A. A. D., Silva, G. A., Oliveira, J. G. D., & Jesus, P. D. D. (2019). Matrizes energéticas sustentáveis.
- [3] LEÃO, Rafael. A Agenda 2030 das Nações Unidas e as energias renováveis no Brasil. 2019.
- [4] EMPRESA, DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2020: Ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020.
- [5] Energética, Empresa De Pesquisa. "Matriz Energética e Elétrica." EPE, 2018.
- [6] Srinivasan, S., Narasimhamurthy, V. & Patnaik, B. Reduced Order Modeling of Two Degree-of-freedom Vortex Induced Vibrations of a Circular Cylinder. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Volume 175, (2018).
- [7] Ogink, R. & Metrikine, A., 2010. A wake oscillator with frequency dependent coupling for the modeling of vortex-induced vibration. Journal of Sound and Vibration, 329(26), (2010).
- [8] Fortaleza, E. Analysis of phenomenological models of vortex-induced vibrations. OMAE 49403, Rotterdam, Noruega. 2011.
- [9] Facchinetti M. L., d. L. E., e F., B. Coupling of structures and wake oscillator in vortexinduced vibrations. Journal of Fluid and Structures, 19, (2004).
- [10] RAMOS, F., ROSA, R., TEMAM, R., "Estimativas Rigorosas para escoamentos turbulentos baseados nas equações de Navier-Stokes". 2006.
- [11] SOARES, Bruno Henriques. Análise crítica de um modelo fenomenológico de vibrações induzidas por vórtices via análise de sensibilidade global e quantificação de incertezas. 2017.
- [12] IWAN, W. D. & B LEVINS, R. D. 1974 A model for vortex induced oscillation of structures. Journal of Applied Mechanics 41.
- [13] BARRERO-GIL, A., Pindado, S. & Avila, S., Extracting energy from Vortex-Induced Vibrations: A parametric study. Applied Mathematical Modelling. 2012.
- [14] FRANZINI, Guilherme R. et al. Comparison between force measurements of one and two degrees-of-freedom VIV on cylinder with small and large mass ratio. In: Proceedings of the 10th International Conference on Flow-Induced Vibration and Flow-Induced Noise (FIV 2012), 3–6 July 2012.
- [15] PAES, Caio Bromonschenkel. Análise De Vibrações Induzidas Por Vórtices Usando Osciladores Não-Lineares. Diss. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.