



AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE PLATAFORMAS OFFSHORE TIPO JAQUETA

Cleidiane Passos Soares¹; Oscar A. Z. Sotomayor²

¹ Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia de Elétrica – clei_passos@hotmail.com

² Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia de Elétrica – oscars@ufs.br

RESUMO

As plataformas fixas tipo jaqueta foram as primeiras estruturas offshore construídas e, até hoje, continuam a ser produzidas e utilizadas. Pelo tempo de vida útil e por estarem expostas ao ambiente oceânico hostil, estas estruturas podem desenvolver fadiga metálica, podendo levar, inclusive, ao colapso do sistema. Assim, há a necessidade constante de avaliar sua integridade estrutural. O objetivo deste trabalho é usar o método de decomposição no domínio da frequência (FDD) para monitorar via simulações numéricas a integridade estrutural de uma plataforma offshore tipo jaqueta, por meio da análise modal em condições de operação normal. Utilizou-se um modelo de 2 graus de liberdade em coordenadas generalizadas para representar a plataforma, enquanto que a equação de Morison é usada para descrever as oscilações naturais produzidas pela força hidrodinâmica de ondas e correntes marinhas. Os resultados obtidos mostram a viabilidade do método proposto na identificação dos parâmetros modais da plataforma, baseada apenas nos sinais de respostas dos deslocamentos da estrutura.

Palavras-chave: Plataforma offshore, Análise modal operacional, Decomposição no domínio da frequência.

1. INTRODUÇÃO

As jaquetas de aço são os sistemas estruturais mais utilizados pela indústria offshore de Exploração e Produção (E&P) no mundo para atividades em águas rasas (profundidades menores do que 400 metros). Quando viáveis, representam a solução de engenharia com a melhor relação custo-benefício, em comparação com os demais tipos de plataforma [CASTRO, 2013].

No entanto, estas estruturas são expostas a diversos tipos de carregamentos. Além da gravidade e da própria carga operacional, elas estão continuamente sujeitas a perturbações dinâmicas oscilatórias, principalmente vento, ondas e correntes marinhas, e ainda de outras, como corrosão, terremotos etc.

A exposição dessas instalações ao ambiente oceânico hostil tem efeitos

prejudiciais a estrutura, como excessivas vibrações que afetam o conforto e a estabilidade das instalações, além da sua fadiga metálica, efeito mais prejudicial destas vibrações, trazendo consigo um alto risco de falha e possível colapso da plataforma [SILVA, 2014].

Assim, a necessidade de reavaliar as jaquetas existentes torna-se bastante relevante para toda a indústria petroleira e para a sociedade em geral, com este objetivo, neste artigo será aplicada a análise modal operacional, uma ferramenta para monitoramento de integridade que é capaz de estimar os parâmetros comportamentais de estruturas a partir de suas respostas dinâmicas.

1.1. Análise modal operacional

A análise modal, estudo dos modos estruturais, é uma das técnicas utilizadas para o estudo e análise dinâmica de



sistemas estruturais. Os modos são, propriedades inerentes de uma estrutura, determinados pelas propriedades do material (massa, amortecimento e rigidez), e condições de contorno da estrutura. Cada modo é definido por uma frequência natural (modal ou ressonância), por um amortecimento modal, e uma forma modal (os chamados "parâmetros modais") [GUILLAUME, 2009]. A existência de danos estruturais num sistema leva a modificação desses modos de vibração, estas alterações manifestam-se como mudanças nos parâmetros modais [SALAWU, 1997].

Análise modal operacional é realizada quando o sinal de excitação na entrada do sistema não é conhecido, geralmente ocorre quando são medidas as respostas de uma estrutura, em operação, a excitação ambiente. Neste caso, assume-se que as forças de excitação são consideradas como uma realização de um processo estocástico gaussiano de tipo ruído branco com média nula. [RODRIGUES et al., 2004]

Algumas técnicas de análise modal operacional no domínio da frequência têm sido desenvolvidas, dentre elas: Transformada de Wavelet [LE et al., 2010], Transformada de Hilbert-Huang [SILVA, 2014] e Decomposição no Domínio da Frequência (FDD) [RODRIGUES et al., 2004]. No presente trabalho a FDD é usada na identificação modal operacional de uma plataforma fixa tipo jaqueta sujeita a perturbações persistentes de forças hidrodinâmicas.

1.2. Plataforma offshore tipo jaqueta

A plataforma fixa tipo jaqueta é constituída por estruturas espaciais tubulares em aço ancoradas no local de operação por estacas cravadas no fundo do mar, projetadas para resistir aos esforços provenientes das ondas, vento e corrente. Além disso, a jaqueta serve de apoio aos condutores e risers de exploração na subida até a planta de

processamento da plataforma [MENEZES, 2007].

Esse tipo de plataforma fixa é formado por dois conjuntos: o convés e a jaqueta. O primeiro representa a própria unidade de E&P, com seus equipamentos, utilidades e, normalmente, um heliponto para apoio logístico. Já o segundo, representa a estrutura que sustenta o convés e que, juntamente com as estacas, mantém a plataforma em sua posição de instalação, ver Fig.1.

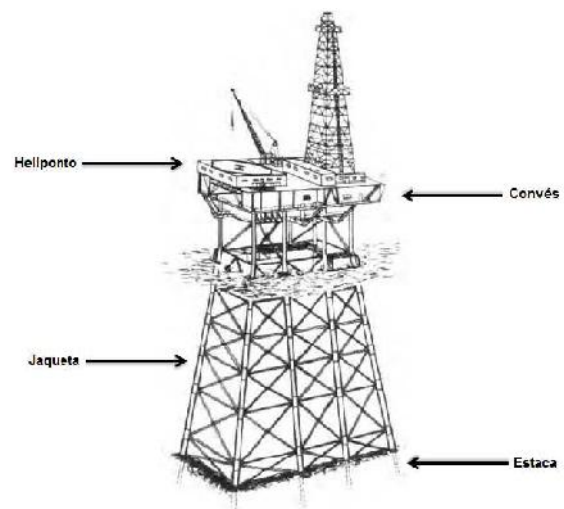


Figura 1: Representação de uma plataforma fixa offshore do tipo jaqueta [CASTRO, 2013].

Estas estruturas sofrem diversos tipos de carregamentos naturais, como: pressão hidrostática (flutuabilidade), corrosão por causa da composição marítima, incrustações marinhas que causam aumento da força de arrasto, marés, tempestades, sismicidade, maremotos, inundações e, principalmente, correntes, ventos e ondas. Em que as ondas são as perturbações dominantes.

2. METODOLOGIA

Uma plataforma fixa *offshore* pode ser modelada como um sistema com múltiplos graus de liberdade. Porém, como as estruturas *offshore* são projetadas para ter uma frequência fundamental maior que a frequência de



excitação dominante, a resposta dinâmica da estrutura é, geralmente, dominada pelo primeiro (e segundo) modo(s) de vibração. Para os propósitos do presente artigo, um modelo de 2 graus de liberdade será considerado para representar uma plataforma *offshore* tipo jaqueta.

2.1 Modelo dinâmico da plataforma

O método de elementos finitos é comumente utilizado na modelagem e análise estrutural de plataformas *offshore* tipo jaqueta. No entanto, para os propósitos do presente trabalho, um modelo de 2 graus de liberdade será considerado para representar a plataforma, conforme proposto por ABDEL-ROHMAN [1993], e cujo diagrama esquemático é mostrado na Fig.2. Esta estrutura possui um dispositivo TMD (Amortecedor de Massa Sintonizado) ativo, conectado a um servo mecanismo hidráulico, instalado no topo da estrutura.

Estruturas *offshore* estão expostas a forças hidrodinâmicas não lineares. A não linearidade destas forças decorre da sua dependência em relação à flexibilidade da estrutura que induz um termo de carga

autoexcitada. Uma força de onda horizontal atuando numa junção de uma estrutura *offshore* é geralmente modelada usando a equação de Morison. Esta equação é amplamente utilizada para estimar cargas de ondas no projeto de plataformas de petróleo e outras estruturas *offshore*.

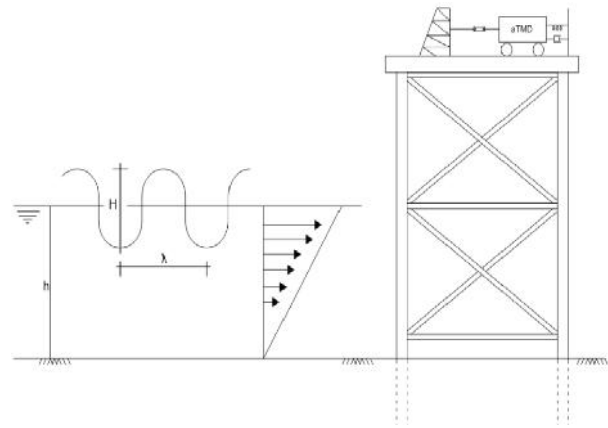


Figura 2: Plataforma sujeita a forças hostis [ZRIBI et al. 2004].

As expressões que descrevem o movimento da plataforma sujeita a forças hidrodinâmicas autoexcitadas não lineares podem ser escritas como mostrado na Eq.[1] [ZRIBI et al., 2004].

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 = -2\xi_1 w_1 \dot{z}_1 - w_1^2 z_1 - \phi_1 K_T (\phi_1 z_1 + \phi_2 z_2) + \phi_1 K_T y - \phi_1 C_T (\phi_1 \dot{z}_1 + \phi_2 \dot{z}_2) + \phi_1 C_T \dot{y} \\ \quad - \phi_1 u + f_1 + f_2 \\ \ddot{z}_2 = -2\xi_2 w_2 \dot{z}_2 - w_2^2 z_2 - \phi_2 K_T (\phi_1 z_1 + \phi_2 z_2) + \phi_2 K_T y - \phi_2 C_T (\phi_1 \dot{z}_1 + \phi_2 \dot{z}_2) + \phi_2 C_T \dot{y} \\ \quad - \phi_2 u + f_3 + f_4 \\ \ddot{y} = -2\xi_T w_T \dot{y} + 2\xi_T w_T (\phi_1 \dot{z}_1 + \phi_2 \dot{z}_2) - w_T^2 y + w_T^2 (\phi_1 z_1 + \phi_2 z_2) + \frac{1}{m_T} u \end{cases} \quad [1]$$

sendo que z_1 e z_2 são as coordenadas generalizadas dos modos vibracionais 1 e 2, respectivamente; y é o deslocamento horizontal do TMD; w_1 e w_2 são as frequências naturais dos primeiros dois modos de vibração; ξ_1 e ξ_2 são os fatores de amortecimento nos dois primeiros modos de vibração, respectivamente; ϕ_1 e ϕ_2 são o primeiro e o segundo vetores de forma modal, respectivamente; ξ_T é o fator de amortecimento do TMD; $w_T = \sqrt{K_T/m_T}$ é a frequência natural do TMD; K_T e m_T são a rigidez e a massa do TMD, respectivamente; C_T é o amortecimento do TMD; u é a ação de controle; e f_1 , f_2 , f_3 e f_4 são os termos da força hidrodinâmica autoexcitada não linear.

Definindo as seguintes variáveis de estado:

$$x_1 = z_1; \quad x_2 = \dot{z}_1; \quad x_3 = z_2; \quad x_4 = \dot{z}_2; \quad x_5 = y; \quad x_6 = \dot{y}$$

O modelo da plataforma da Eq.[1] pode ser escrito na forma de espaço de estados como segue:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fg(x, t)$$

[2]



Sendo que:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(w_1^2 + \phi_1^2 K_T) & -(2\xi_1 w_1 + \phi_1^2 C_T) & -\phi_1 \phi_2 K_T & -\phi_1 \phi_2 C_T & \phi_1 K_T & \phi_1 C_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\phi_1 \phi_2 K_T & -\phi_1 \phi_2 C_T & -(w_2^2 + \phi_2^2 K_T) & -(2\xi_2 w_2 + \phi_2^2 C_T) & \phi_2 K_T & \phi_2 C_T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ w_T^2 \phi_1 & 2\xi_T w_T \phi_1 & w_T^2 \phi_2 & 2\xi_T w_T \phi_2 & -w_T^2 & -2\xi_T w_T \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\phi_1 \\ 0 \\ -\phi_2 \\ 0 \\ \frac{1}{m_T} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad g(x, t) = \begin{bmatrix} f_1 + f_2 \\ f_3 + f_4 \end{bmatrix}$$

Apresentado o modelo da plataforma utilizado, segue a explicação do método de análise modal operacional estudado.

2.2 Decomposição no domínio da frequência

As vibrações ambientais têm natureza de entradas múltiplas e com frequência de banda larga sendo capazes de excitar um número significativo de modos. Por simplificação, os métodos de identificação modal operacional assumem o ruído branco de média zero como entrada, este é o caso do método de decomposição no domínio da frequência (FDD) cuja formulação foi desenvolvida por Brincker, detalhes da formulação pode ser encontrados em [BRINCKER et al., 2010].

No método FDD, para identificação dos modos de vibração de um sistema, constrói-se uma matriz de funções de densidade espectral, com autoespectros (PSD) na diagonal principal e espectros cruzados (CSD) nas outras posições. A matriz de funções de densidade espectral é, em cada frequência discreta, decomposta em valores singulares e vetores utilizando o algoritmo de decomposição em valores singulares (SVD).

O(s) modo(s) dominante(s) aparece(m) no primeiro espectro de valor singular e os outros modos nos outros

espectros de valores singulares. A partir da análise destes espectros é possível identificar as funções de densidade de potência autoespectrais que correspondem a cada modo de um sistema, o qual pode incluir partes de vários espectros de valores singulares, dependendo do modo que é dominante em cada frequência. No método de FDD, os modos de vibração são estimados com os vetores singulares no pico de cada função de densidade de potência autoespectral correspondente a cada modo.

No entanto, não é possível detectar o amortecimento modal com esse método, por isso, será utilizado um procedimento do método de decomposição no domínio da frequência avançado (EFDD), no qual, a seleção dos autoespectros correspondentes a cada modo (1DOF) é realizada com base nos valores do coeficiente *Modal Assurance Criterion* (MAC) dos vetores singulares entre o pico de ressonância e as frequências próximas. Estas funções de densidade autoespectral são, então, transformadas para o domínio do tempo, pela transformada inversa de Fourier, resultando em funções de autocorrelação, para cada modo de um sistema. Os coeficientes de amortecimento são estimados a partir do decremento logarítmico das referidas funções de



autocorrelação [RODRIGUES et al., 2004]. O resumo do método pode ser visualizado no fluxograma da Fig.3.

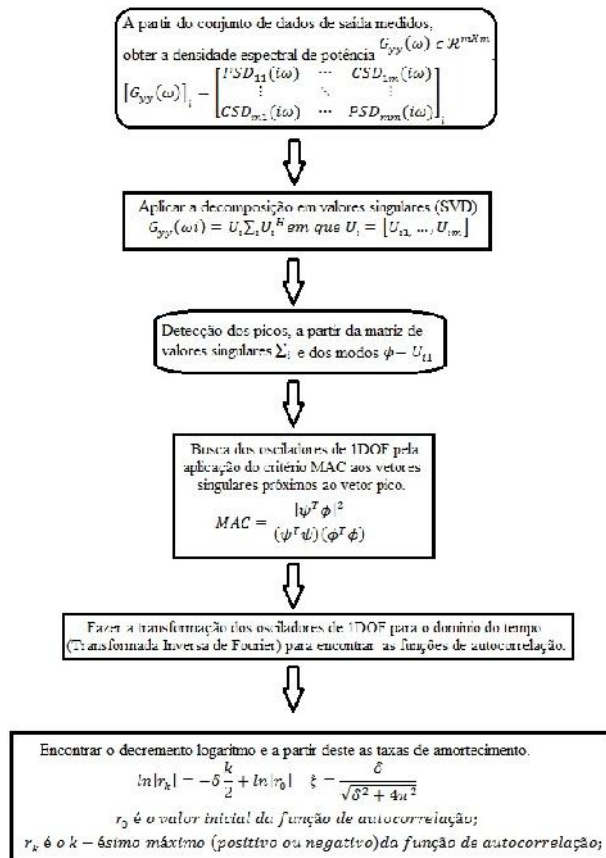


Figura 3: Fluxograma do método de FDD [SOARES, 2015].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realizar a simulação foram utilizados os seguintes dados de onda

Usando os valores dos parâmetros do sistema, obteve-se:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3,3235 & -0,0212 & 0,0184 & 0,0030 & -5,3449 & -0,8819 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0184 & 0,0030 & -118,1385 & -0,1117 & 5,3468 & 0,8822 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0,0114 & -0,0019 & 0,0114 & 0,0019 & -3,3051 & -0,5454 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,003445 \\ 0 \\ -0,00344628 \\ 0 \\ 0,00213 \end{bmatrix}$$

[ZRIBI et al., 2004]: $H = 12,19$ m, $h = 76,2$ m, $r = 182,88$ m e $U_{ow} = 0,122$ m/s. A densidade do aço é $7730,7$ kg/m³, a densidade da água é $\rho_w = 1025,6$ kg/m³ e o peso do convés de concreto suportado pela estrutura de aço é 6672300 N. Com estes dados, conjuntamente com os dados obtidos em [ABDEL-ROHMAN, 1993], os parâmetros de força de onda em cada junção da estrutura foram calculados.

As frequências naturais dos modos de vibração 1 e 2 são $w_1 = 1,818$ Hz e $w_2 = 10,8683$ Hz, respectivamente. O amortecimento estrutural em cada modo é considerado 0,5%, i.e. $\xi_1 = \xi_2 = 0,005$, e as contribuições das formas modais são $\phi_1 = -0,003445$ e $\phi_2 = 0,00344628$. Os parâmetros do TMD foram escolhidos para estar em sintonia com o primeiro modo, tal que $w_T = 1,818$ Hz, $\xi_T = 0,15$, $K_T = 1551,5$ e $C_T = 256$ [ZRIBI et al., 2004].

Os autovalores da matriz A são $-0,0560 \pm 10,8690j$, $-0,0276 \pm 1,8117j$ e $-0,2557 \pm 1,8059j$. Isto implica que a parte linear do modelo do sistema é estável. Entretanto, dado que estes autovalores estão muito próximos do eixo imaginário, o desempenho do sistema não é bom. [SILVA, 2014].



Na Fig.4 e na Fig.5 são apresentados a força hidrodinâmica da onda atuando sobre a plataforma, derivada da equação de Morison, e os respectivos deslocamentos laterais dos três andares da plataforma (estrutura + TMD) para uma frequência de onda = 0,5773 Hz. As amplitudes das oscilações pico a pico dos três andares são 0,4534 m, 0,4935 m e 0,5214 m.

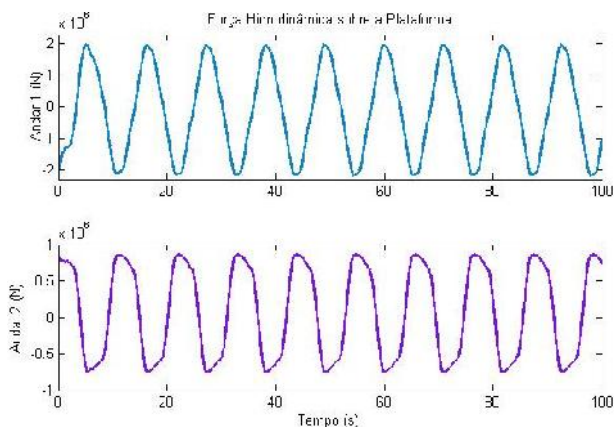


Figura 4: Força hidrodinâmica da onda sobre a plataforma ($\omega = 0,5773$ Hz).

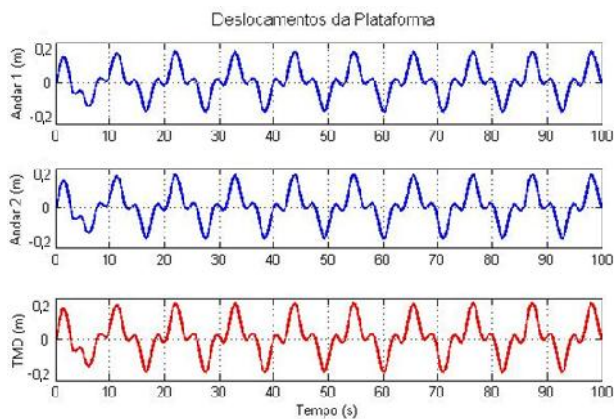


Figura 5: Resposta da plataforma para uma frequência de onda $\omega = 0,5773$ Hz.

Os sinais de deslocamento dos dois andares da plataforma (Fig.5) foram processados segundo os dois primeiros passos do fluxograma da Fig.3, produzindo a decomposição em valores e vetores singulares das matrizes de densidade espectral. A Fig.6 apresenta as magnitudes dos dois valores singulares, para o intervalo de frequência de 0 a 25 Hz, em que o gráfico em azul representa

o 1º valor singular e o gráfico em vermelho o 2º valor singular.

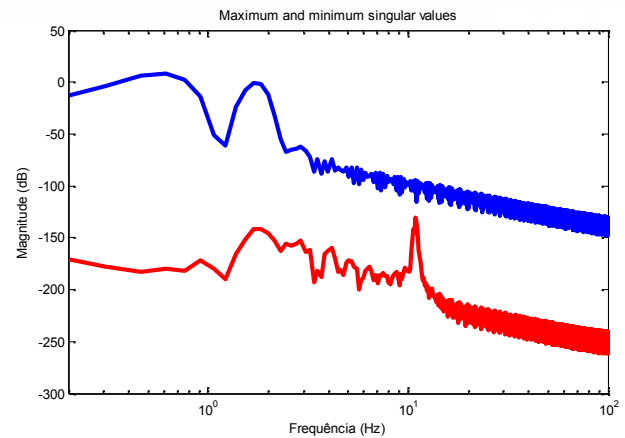


Figura 6: SVD das matrizes de densidade espectral para resposta de deslocamento da plataforma (com 100s de duração).

Nesta Fig.6 são identificadas duas características interessantes, a primeira é a detecção da frequência fundamental de excitação do sistema no gráfico do 1º valor singular e a segunda é que não se pode visualizar o pico do segundo modo no gráfico do 1º valor singular, apenas no gráfico do 2º valor singular.

Ambas as situações são justificadas pelas características do tipo de excitação empregada na simulação. Para explicar a primeira situação é importante lembrar que o FDD mantém a hipótese das excitações serem processos gaussianos estacionários tipo ruído branco com média nula. E segundo RODRIGUES et al.[2004] se esta hipótese não se verifica, ou seja, se as forças de excitação contiverem componentes com frequências claramente dominantes, então nessas frequências surgirão picos na amplitude das funções de densidade espectral e por consequência nos valores singulares.

Já a justificativa para a segunda situação é que o 1º valor singular é responsável pela identificação dos modos dominantes da estrutura, o qual para o modelo de plataforma é justamente o 1º modo que possui frequência (1,818 Hz). O domínio do primeiro modo na resposta



dinâmica pode ser observado com mais clareza no cálculo do MAC, Fig.7.

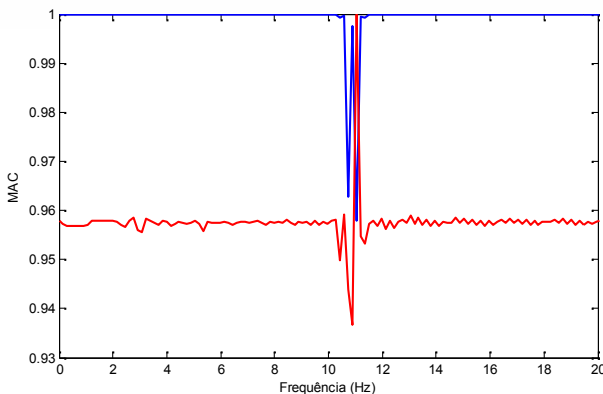


Figura 7: MAC entre os picos de ressonância e os demais vetores singulares.

Observando a Fig.7, mais precisamente o gráfico em azul, percebe-se que praticamente todos os vetores singulares são similares ao vetor singular do 1º modo (1,841 Hz), exceto o vetor singular do 2º modo (11,04 Hz). O gráfico em vermelho confirma a não similaridade do vetor singular do 2º modo em relação aos demais vetores.

Na realização dos ensaios de medição das respostas estruturais às ações ambientais é muito importante a duração total dos registros obtidos. Pois nos ensaios com excitação natural não há controle sobre as forças de excitação, tornando-se conveniente registrar as respostas durante um tempo longo como forma de assegurar que durante esse período todos os modos do sistema sejam suficientemente excitados.

Portanto, o modelo de plataforma foi simulado por um tempo 10 vezes maior que o utilizado na simulação anterior, a forma de onda e deslocamento obtidos foram similares ao apresentado na Fig. 4 e Fig. 5, respectivamente, com registro de 1000 segundos de duração. Utilizando esses novos sinais de deslocamento dos dois andares da plataforma foram aplicados, novamente, os passos 1 e 2 do fluxograma, e obtida uma nova SVD para as novas matrizes de densidade

espectral. A Fig. 8 apresenta os novos valores singulares, para o intervalo de frequência de 0 a 100 Hz. O gráfico em azul representa o 1º valor singular e o gráfico em vermelho o 2º valor singular.

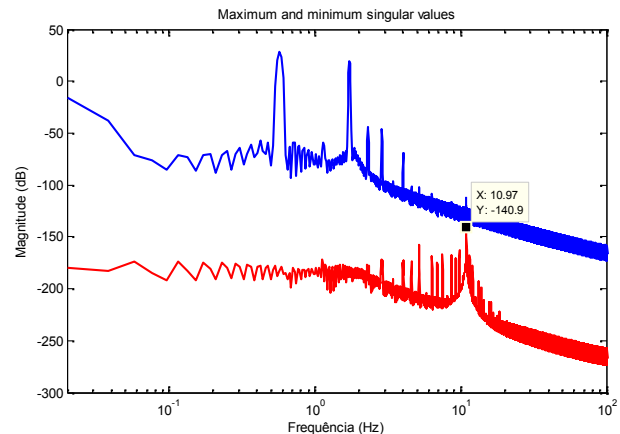


Figura 8: SVD das matrizes de densidade espectral da resposta de deslocamento da plataforma (com 1000s de duração).

Na nova SDV, Fig.8, é possível identificar o pico, embora discreto, do 2º modo no 1º valor singular, cuja frequência é de 10,97 Hz. Além, dos picos correspondentes à frequência de excitação (0,5752 Hz) e à frequência natural do 1º modo (1,764 Hz).

A Tab.1 apresenta, a modo de comparação, os valores analíticos do modelo e os calculados usando FDD da frequência natural dos modos.

Tabela 1-Frequência natural dos modos.

	Frequência (Hz)		
	FDD	Modelo	Erro Relativo
Modo1	1,764	1,818	2,97%
Modo2	10,97	10,87	0,92%

Além das frequências encontradas, pode-se ver na Fig. 8 que há picos em outras frequências que não estão descritas no modelo da plataforma. Entre elas, estão: 1,15 Hz, 2,30 Hz, 2,895 Hz e 4,05 Hz. Essas frequências podem ser justificadas pela não linearidade do modelo e da formulação de Morison. Essas frequências possuem amplitudes maiores que a frequência do 2º modo por



estarem mais próximas da frequência de excitação e serem, portanto, mais requisitadas.

Para verificar a similaridades dos vetores singulares correspondentes aos dois modos de vibração da plataforma, foi utilizando novamente o cálculo do MAC. A Fig.9 mostra o resultado do MAC (1º modo, em azul, e o 2º modo, em vermelho).

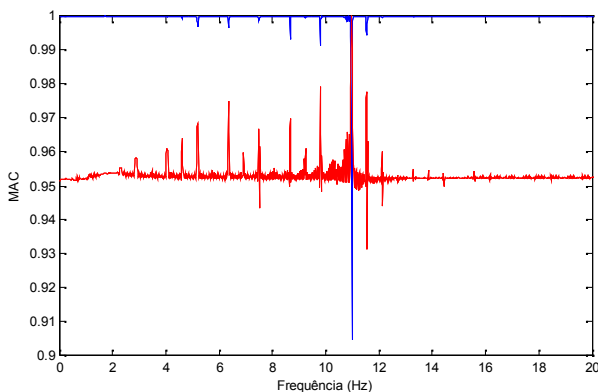


Figura 9: MAC entre os picos de ressonância e os demais vetores singulares.

Observando a Fig.9, percebe-se que o gráfico em vermelho, que representa a similaridade do vetor singular do 2º modo em relação aos demais, é muito mais expressivo que o da Fig.7, isso demonstra que com o aumento na duração das medições foi possível detectar a resposta desse modo, ou seja, este foi excitado pelo sinal de onda de entrada. A Fig. 10 mostra em detalhes o MAC na região do 2º modo para resposta de 1000 segundos.

Com o valor de MAC mostrado na Fig.10 foi possível isolar a função de um grau de liberdade (1DOF) do segundo modo no intervalo de 10,93 Hz a 10,99 Hz. Já para o primeiro modo foi utilizado o intervalo de 1,534 Hz a 2,11 Hz. Na Fig.11 são mostradas as regiões delimitadas no 1º valor singular. Essas regiões delimitadas foram transformadas em duas funções de 1DOF às quais aplicou-se a transformada inversa de Fourier.

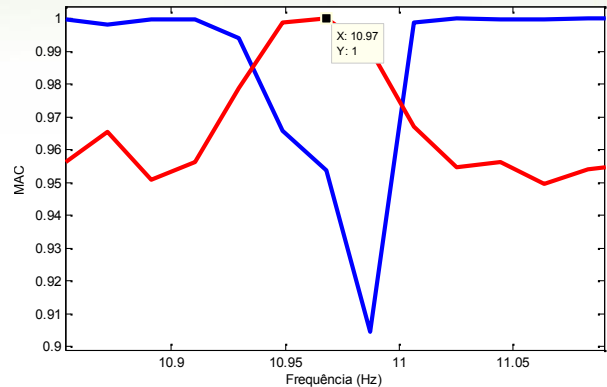


Figura 10- MAC perto do pico de ressonância do 2º modo para resposta de deslocamento com duração de 1000 s.

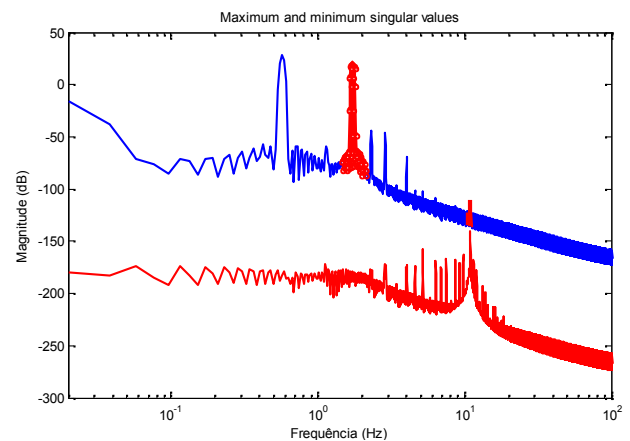


Figura 11: Separação dos picos.

As funções de autocorrelação obtidas para os dois modos são apresentadas na Fig.12 e Fig.13.

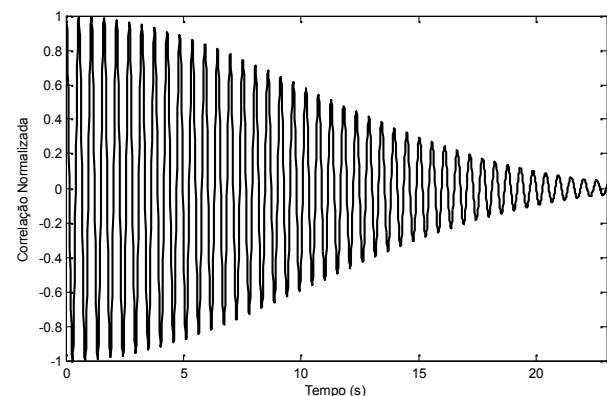


Figura 12: Correlação normalizada para o primeiro oscilador de 1DOF (modo 1).

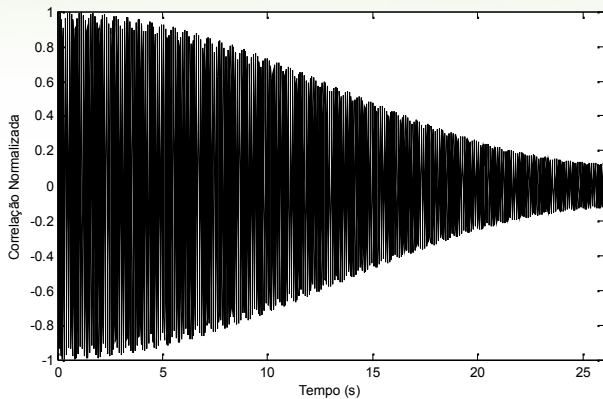


Figura 13: Correlação normalizada para o segundo oscilador de 1DOF (modo 2).

Foi aplicado o decremento logaritmo aos valores máximos e mínimos de cada oscilador. Considerando apenas os pontos mais relevantes do logaritmo foram ajustadas retas, cujos coeficientes angulares serão utilizados no cálculo do amortecimento modal. A Fig.14 e a Fig.15 ilustram o ajuste linear realizado no logaritmo da função de autocorrelação dos modos 1 e 2, respectivamente.

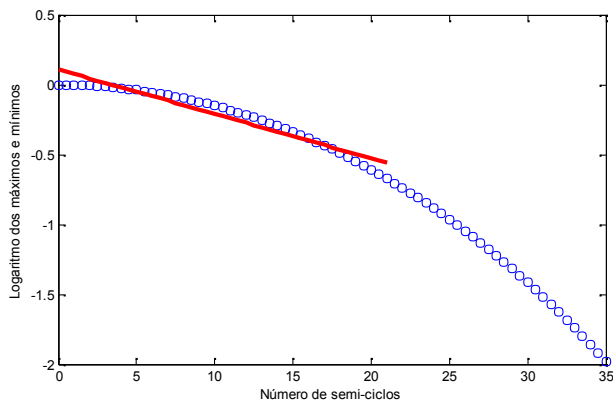


Figura 14: Ajuste linear do logaritmo da função de autocorrelação para o 1º modo, o coeficiente angular encontrado foi $\approx 0,0318$.

Com os valores dos coeficientes angulares para as retas ajustadas na Fig.14 e na Fig.15 foi possível calcular as taxas de amortecimento de cada modo. Os resultados podem ser observados na Tab.2 que apresenta a comparação entre os valores analíticos do modelo e os calculados via FDD.

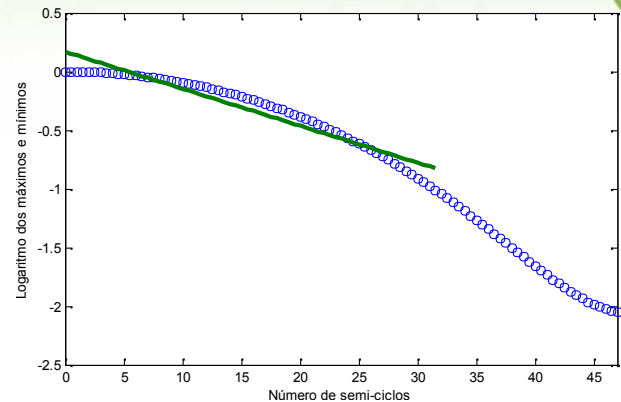


Figura 15: Ajuste linear do logaritmo da função de autocorrelação do 2º modo, o coeficiente angular encontrado foi $\approx 0,0315$.

Tabela 2 - Valores comparativos entre o amortecimento calculado e o do modelo.

	Amortecimento modal		Erro Relativo
	FDD	Modelo	
Modo 1	0,0051	0,005	2%
Modo 2	0,005	0,005	0%

A capacidade do FDD na detecção dos parâmetros modais é notória, resultados com erros relativos menores que 3%, até mesmo quando as excitações do sistema fogem da hipótese de ruído branco a partir do qual o método foi desenvolvido.

É importante comentar que quando se trata de detecção da dinâmica de plataformas, ou de grandes estruturas civis, os modos mais importantes são os localizados próximos das frequências das excitações (geralmente frequências baixas), pois os modos estruturais afastados se comportam como se fossem estáticos.

Em plataformas reais, as diversas excitações ambientais— correntes, ventos, ondas regulares e irregulares, movimento das máquinas etc— funcionaram como sinais de banda larga para os modos de interesse (modos com frequências próximas das excitações).



4. CONCLUSÕES

A identificação modal operacional surgiu como opção para análise dinâmica de grandes estruturas, utilizando-se da característica multi-entrada das ações ambientais, capazes de excitar os sistemas em diferentes pontos simultaneamente.

Os resultados alcançados neste trabalho mostram que o método FDD é capaz de identificar as frequências naturais e os amortecimentos modais da plataforma offshore com precisão e confiabilidade consideráveis, usando apenas a resposta da estrutura excitada naturalmente pelas forças hidrodinâmicas de ondas e correntes marinhas.

A FDD torna-se uma solução para a análise dinâmica de estruturas que não podem ter seu funcionamento interrompido, como as plataformas de petróleo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do PRH-ANP 45.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-ROHMAN, M. **Control of nonlinear vibrations in civil structures**. Kuwait University Press, 1993.

BRINCKER, R.; ZHANG, L.; ANDERSEN, P. **Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition**. Institute of Physics Publishing: Smart Materials and Structures. 441- 445, 2010.

CASTRO, F. M. O. **Análise Não Linear de Plataformas Fixas Offshore do Tipo Jaqueta de Aço: Estudo e Aplicação do Método Quasiestático Pushover**. 2013, Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

GUILLAUME, P. **Modal Analysis**. Department of Mechanical Engineering, Vrije Universiteit Brussel, 2009.

LE, T; TAMURA, Y. **Modal Identification of Ambient Vibration Structure Using Frequency Domain Decomposition and Wavelet Transform**. In: Proc. of the Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Taipei, Taiwan, 2010.

MENEZES, P.V. **Metodologias de Análise e Projeto de Estruturas Reticuladas na Exploração de Petróleo Offshore**. 2007. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

RODRIGUES, J.; BRINCKER, R.; ANDERSEN, P. **Improvement of Frequency Domain Output-Only Modal Identification from the Application of the Random Decrement Technique**. In: Proc. of the 23th Modal Analysis Conference (IMAC), 2004.

SALAWU, O. S. **Detection of structural damage through changes in frequency: a review**. *Engineering Structures*, 9 (19): 718-723, 1997.

SILVA, L. da. **Análise Modal e Controle de Plataformas Offshore Sujeitas a Perturbações Persistentes**. 2014, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, Brasil.

SOARES, C. P. **Avaliação da Integridade Estrutural de Plataformas Offshore tipo Jaqueta usando Decomposição no Domínio Da Frequência**. 2015, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Sergipe, Brasil.

ZRIBI, M.; ALMUTAIRI, N.; ABDEL-ROHMAN, M.; TERRO, M. **Nonlinear and robust control schemes for offshore steel jacket platforms**. *Nonlinear Dynamics*, 35(1): 61-80, 2004.