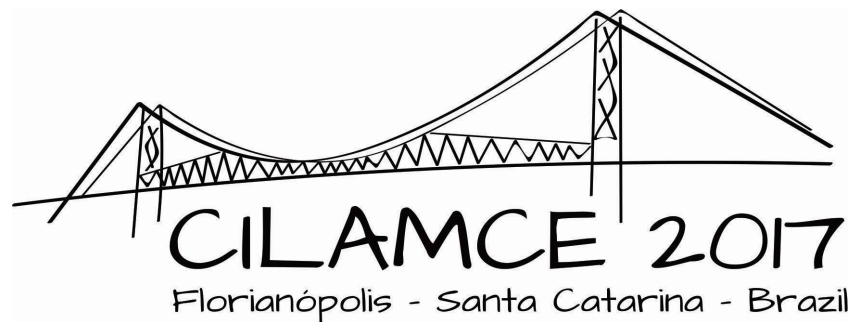




ESTUDO COMPARATIVO DA DISCRETIZAÇÃO DE ESPECTRO DE ONDAS EM PROJETOS DE RISERS E LINHAS DE ANCORAGEM DE UNIDADES FLUTUANTES OFFSHORE.

Nathalia Salles Farias

Fabício Nogueira Corrêa

Breno Pinheiro Jacob

Mauro Henrique Alves de Lima Junior

nathalia@lamcso.coppe.ufrj.br

fabricao@lamcso.coppe.ufrj.br

breno@lamcso.coppe.ufrj.br

mauro@lamcso.coppe.ufrj.br

COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia,
PEC – Programa de Engenharia Civil, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Avenida Pedro
Calmon, S/N, CEP 21941-596, Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

Abstract. *With the advancement of oil companies in exploration and production in ever deeper waters, there is a growing need for new technologies, especially in what refers to the development of platforms, anchorage systems and Risers for these conditions. At the same time, numerical simulators have been incorporating new mathematical formulations validated with experimental tests to represent in a more realistic way the behavior of these systems, always seeking a balance between precision and computational cost.*

In this context, this work presents parametric studies about the influence of discretization procedures of sea spectra in an methodology of integrated project of anchoring and risers; More specifically, in the first and second order motion response of floating production units and in the response of the stresses of the anchor lines and risers. The parameters studied involve the number of wave components as well as different types of spectrum discretization.

Keywords: *Discretization of Waves Spectrum, Anchoring Lines, Offshore, Risers.*

1 INTRODUÇÃO

Entre as inúmeras variáveis de projeto que devem ser consideradas ao modelar e analisar um sistema de produção de petróleo offshore (tipo e geometria da embarcação, profundidade da água, layout das linhas de amarração e risers etc.), um fator chave é a representação de cargas ambientais em geral e particularmente cargas de ondas compreendendo seurates irregulares.

Um das dificuldades em criar uma plataforma logística é garantir a estabilidade em mar agitado para permitir a atracação segura, como também à chegada e saída de navios e helicópteros. Uma das primeiras soluções encontradas essenciais ao avanço em águas profundas e que atualmente é uma das mais empregadas consiste na utilização de sistemas flutuantes ancorados.

Os sistemas de ancoragem são compostos por um conjunto de linhas de ancoragem, que é composta por diferentes materiais, com várias composições. Com a função de manter a posição da unidade flutuante no mar. A composição das linhas de ancoragem e o tipo de ancoragem utilizado vai variar de acordo com o tipo de embarcação, a lâmina d'água, o tipo de operação realizada, custo entre outros parâmetros.

Já a produção é dada através dos *risers* que são tubos que fazem a ligação entre os poços de petróleo, no fundo do mar, e as plataformas ou navios, na superfície. O *riser* é considerado como uma das partes críticas de um sistema de exploração offshore, pois essas estruturas ficam continuamente sujeitas às ações dinâmicas de ondas, correntes marítimas e movimento da plataforma, podendo ter o seu comportamento influenciado pelo grande número de esforços a que são submetidos.

A frequência dos estados de mar irregulares podem excitar e amplificar a resposta dinâmica do sistema estrutural, neste contexto, a metodologia atualmente estabelecida para o projeto de linhas de amarração e *risers* conectados a sistemas de produção flutuante de águas profundas requer análises dinâmicas não-lineares usando métodos de solução de domínio do tempo, com uma representação rigorosa das linhas por modelos elemento finito.

O Tipo de modelo de onda espectral usado foi o de *JONSWAP* para representar os estados do mar. Para análises de domínio do tempo, os modelos espectrais são representados como uma soma de ondas regulares com diferentes períodos, alturas e fases aleatórias. Esses componentes da onda devem representar a energia total do modelo espectral, e também as elevações e as velocidades das ondas observadas no estado de mar irregular. Além disso, são necessários longos tempos de simulação (nesse caso 10800s) para obter estabilidade estatística da resposta aleatória ao estado de mar irregular, incluindo, por exemplo, os valores extremos dos movimentos da plataforma e as tensões superiores.

Todos esses fatores acima mencionados podem levar a tempos computacionais excessivos e motivar os estudos apresentados neste trabalho, relacionados a uma representação simplificada de estado de mar irregulares, adequados para etapas preliminares de projeto. Por exemplo, no contexto da metodologia de projeto proposta por Girón et al. (2014), onde milhares de casos de carregamento ambiental devem ser empregados para acelerar análises destinadas a selecionar casos críticos, que devem ser posteriormente verificados usando métodos mais rigorosos.

Neste sentido, esse trabalho tem o intuito de investigar a influência de procedimentos de discretização de espectros na resposta de primeira e segunda ordem de unidades de produção

offshore, a influência na resposta de tração, bem como na resposta dos esforços das linhas de ancoragem e risers. Utilizando a ferramenta SITUA-Prosim desenvolvido pelo LAMCSO/PEC/COPPE/UFRJ.

2 REPRESENTAÇÃO DE UM ESTADO DE MAR

Uma onda do mar pode ser descrita pelos seus principais parâmetros característicos: altura, período, comprimento de onda, elevação e velocidade de propagação.

Um estado de mar representa a energia das ondas por dois parâmetros estatísticos fundamentais: altura de onda significativa “ H_s ” e o período de cruzamento zero “TZ” (alternativamente, período de pico “TP”), estes parâmetros são supostos constantes para cada um curto período (geralmente de 3 horas).

Um estado de mar pode ser representado por duas maneiras distintas: o estado de mar regular, e o estado de mar irregular, que serão descritos conforme será descrito adiante.

O estado de mar regular que fundamenta os modelos chamados de determinístico, onde o comportamento das ondas é caracterizado por um único trem de ondas com uma altura H (definida pela distância vertical entre crista e cavado) e comprimento L característicos, o período entre as cristas T ; a profundidade d ; o nível médio MWL e a elevação da superfície η , como pode ser visto na Figura 1. Mesmo esta teoria sendo simplificadora, pois a mesma não leva em conta o comportamento real aleatório das ondas do oceano, ela ainda é muito utilizada para a representação das ondas no projeto de plataformas, também são comumente utilizadas para estimar a resposta das estruturas offshore aos carregamentos externos, além de serem importantes para o entendimento de ondas irregulares.

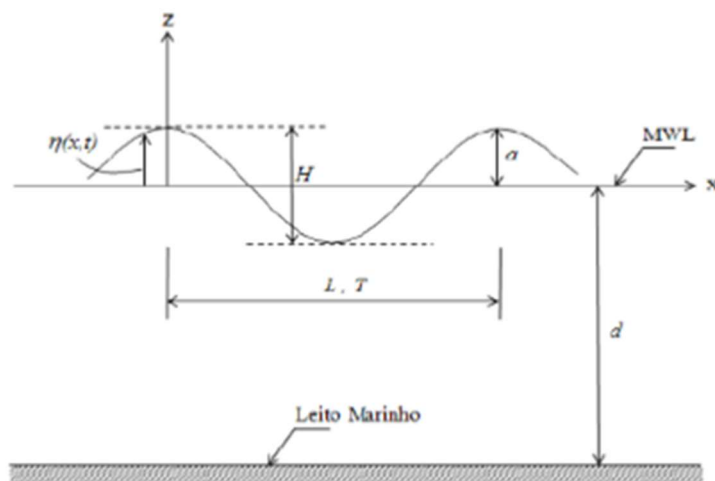


Figura 1: Representação de uma Onda Regular. (BAHIENSE, 2007)

O estado de mar irregular leva em conta a natureza randômica das ondas, consistindo assim num método mais realístico, pois o mar é caracterizado pela superposição linear de várias ondas regulares com diferentes períodos, amplitudes e fases, mas que em conjunto possuem uma média, desvio padrão e outras propriedades estatísticas.

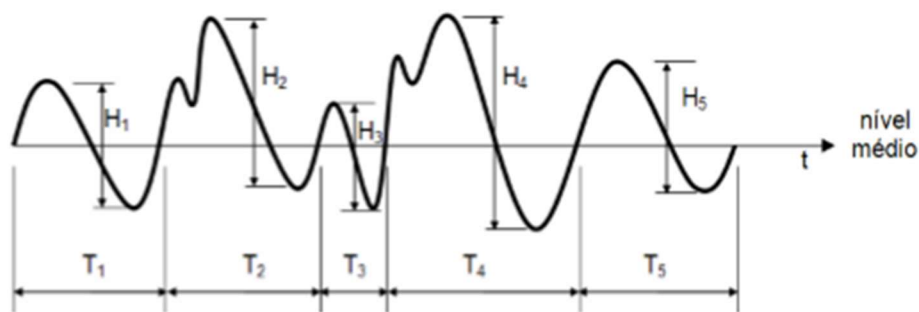


Figura 2: Representação de uma onda Irregular. (BAHIENSE, 2007)

Na Figura 2, os valores T_1 , T_2 ... T_5 são referentes a períodos de cruzamento zero ascendente de ondas individuais, e H_1 , H_2 ... H_5 são as respectivas alturas de onda. Os períodos de onda são definidos como sendo o período decorrido entre sucessivos cruzamentos do nível médio do mar. Da mesma forma, as alturas de onda individuais são definidas como sendo a diferença entre as elevações máximas e mínimas para um dado período de cruzamento.

2.1 REPRESENTAÇÃO ESPECTRAL

O ajuste do modelo espectral é feito em termos de parâmetros estatísticos, tais como fatores de forma espectral, altura significativa de onda e período de pico. Na estatística de curto prazo, estes parâmetros são supostos constantes, cada conjunto deles caracterizando um “estado de mar”. A escolha do espectro de mar e de seus parâmetros característicos é função do fenômeno a ser estudado e dos levantamentos em medições realizadas na posição geográfica a que se queira referir.

Os espectros que tem o uso mais comum são o modelo de *Pierson-Moskovitz* (1964), baseado na altura significativa de onda ou velocidade de vento, o *Bretschneider* (1969) e *Jonswap* (Hasselmann, 1973 a 1976). Atualmente, a empresa Petrobras utiliza o Espectro de *Jonswap* com alguns parâmetros ajustados para representar o estado de mar na Bacia de Campos.

Para o cálculo dos valores que caracterizam o comportamento das partículas do fluido em um dado ponto no espaço e um instante no tempo (tais como velocidades, acelerações e pressões), primeiramente efetua-se um procedimento de discretização do espectro em termos de um somatório de um número arbitrado de componentes de onda regular. Neste procedimento, determinam-se os valores que caracterizam cada componente: períodos (ou frequências), amplitudes e fases. Para cada componente aplicam-se as expressões de Airy, obtendo-se, por exemplo, as velocidades e acelerações em um dado ponto. Finalmente, os valores desejados para o estado de mar irregular podem ser determinados pelo somatório dos valores calculados para cada componente de onda regular.

Existem diferentes procedimentos para efetuar a discretização do espectro e determinar os períodos, amplitudes e fases de cada componente de onda regular. Em geral, as fases são geradas aleatoriamente a partir de uma distribuição uniforme de probabilidade no intervalo $(0, 2\pi)$ radianos; as amplitudes de cada componente de onda são determinadas a partir da parcela de energia a ela associada no espectro.

Segundo CHAKRABARTI (2005), dentre os modelos espectrais que descrevem um mar irregular, destacam-se o Espectro de *Pierson-Moslowitz* (mais comum, de um único parâmetro) e o Espectro de *Jonswap* (utilizado em águas profundas, contendo cinco parâmetros).

O espectro de *Jonswap* resultou originalmente de um projeto conjunto executado no Mar do Norte, de onde deriva seu nome (JOint North Sea WAve Project). A expressão para o espectro de *Jonswap* pode ser escrita da seguinte forma:

$$S_{Hs,Tz}(\omega) = \alpha \frac{g^2}{2\pi^5 \omega^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (1)$$

Esta expressão fornece a partir de um valor de frequência ω (em Hz), a densidade de energia correspondente $S(\omega)$. Os parâmetros variáveis do espectro são a frequência de pico ω_p (em Hz), e os parâmetros de forma α e γ (este último conhecido como o “parâmetro de pico”).

Recentemente a Petrobras propôs empregar uma expressão do espectro de *Jonswap* ajustada para as condições de onda da Bacia de Campos. Em particular, para projetos de fadiga estocástica, o espectro de onda de *Jonswap* pode ser usado na faixa de $4s \leq T_p \leq 17.7s$ e $0.47m \leq H_s \leq 6.51m$, Estabelecendo as seguintes relações para determinar os parâmetros de forma α e γ a partir de H_s e T_p :

$$\gamma = \exp \left[1.0394 - 0.01966 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right] \quad (2)$$

$$\alpha = 5.0609 \frac{H_s^2}{T_p^4} [1 - 0.287 \ln(\gamma)] \quad (3)$$

2.2 TIPOS DE MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO DO ESPECTRO DA ONDA

Existem diversos procedimentos para determinar os valores dos intervalos de frequência $\Delta\omega_n$, os valores representativos de frequência ω_n e as amplitudes a_n . Os procedimentos mais usuais, são os seguintes:

- Intervalos de frequência constantes;
- Intervalos de frequência constantes, com valor da frequência tomada aleatoriamente dentro do intervalo;
- Amplitudes constantes.
- Intervalo de períodos constantes;
- Intervalo de períodos constantes com amostragem aleatória.

Os itens a seguir descrevem cada um dos procedimentos relacionados acima.

2.2.1 Intervalos de Frequência Constante

No caso da discretização por intervalos constantes, tem-se simplesmente $\Delta\omega_n = \Delta\omega_0$ (constante para todas as componentes de onda), onde $\Delta\omega_0$ é um valor calculado dividindo-se a faixa de frequências global do espectro pelo número de componentes de onda definido pelo analista.

A amplitude de cada componente de onda é dada por:

$$a_i = \sqrt{2S_i \Delta\omega} \quad (4)$$

Onde S_i é a área da i -ésima faixa em que foi dividido o espectro.

Neste procedimento, a frequência associada à i -ésima componente de onda é tomada simplesmente como o ponto médio do intervalo:

$$\omega_n = \frac{\omega_f + \omega_i}{2} \quad (5)$$

Onde ω_i é a frequência inicial do intervalo e ω_f é a frequência final.

2.2.2 Intervalos de Frequência Constantes, com Frequência Aleatória

Este procedimento é semelhante ao anterior, diferindo apenas no critério de determinação da frequência associada à i -ésima componente de onda. Neste caso, para evitar efeitos de periodicidade, o valor da frequência é gerado aleatoriamente dentro do intervalo entre ω_i e ω_f . A Figura 17 apresenta as alturas de onda geradas por este tipo de discretização.

2.2.3 Amplitudes Constantes

O procedimento de amplitudes constantes tem tido pouca aplicação prática em projetos recentes, pois exige um tratamento especial para a discretização das extremidades do espectro, pois nesse tipo de discretização é mantida a área constante.

Os procedimentos baseados em intervalos de frequência constantes, por sua vez, não apresentam este requisito. Além disso, quando se usa a frequência aleatória no lugar da frequência média dentro de cada intervalo, evita-se a periodicidade das frequências, reforçando assim a característica aleatória do processo.

2.2.4 Intervalos de Períodos Constantes

No caso da discretização por períodos constantes, tem-se $\Delta T_n = \Delta T_0$ (constante para todas as componentes de onda), onde ΔT_0 é um valor calculado dividindo-se a faixa de Períodos do espectro (entre energias significativas) pelo número de componentes de onda definido pelo analista. Assim:

$$T_i = T_{Máx} - \Delta T_0, i = 1, N \quad (6)$$

$$T_i = \frac{1}{T_i} \quad (7)$$

Encontra-se

$$\Delta\omega_0 = \omega_i - \omega_{i-1}, i = 1, N \quad (8)$$

A amplitude de cada componente de onda é dada por:

$$a_i = \sqrt{2S_i \Delta\omega} \quad (9)$$

Onde S_i é a área da i -ésima faixa em que foi dividido o espectro.

2.2.5 Intervalos de Períodos Constantes, com Amostragem Aleatória

Este procedimento é semelhante ao anterior, diferindo apenas no critério de determinação do período associado à i -ésima componente de onda. Neste caso, para evitar efeitos de periodicidade ou aliasing, o valor do período é gerado aleatoriamente dentro de cada intervalo, fazendo:

$$T_i = T_{max} - \Delta T_0 \cdot Phas(i), i = 1, N \quad (10)$$

Onde, $Phas(i)$ é gerado randomicamente.

3 ESTUDO DE CASO

Nesse trabalho serão realizados estudos comparativos dos métodos de discretização e também um estudo de sensibilidade do número de componentes de onda para representação numérica de estados de mar irregulares com aleatoriedade. Será investigada a influência destes parâmetros na resposta de primeira e segunda ordem de unidades de produção offshore, além de estudar a influência na resposta de tração de linhas de ancoragem e *risers*. Procurando avaliar o número de componentes de onda que atenda a melhor relação entre custo computacional e precisão nas respostas do sistema offshore.

Cabe recordar que o aumento do número de componentes de onda, melhora a discretização do espectro teórico (nesse caso o de *Jonswap*), o que significa gerar sinais de elevações de onda com menos concentração de energia por componente; de modo a representar melhor o mar irregular especificado pela distribuição de energia do espectro teórico.

Por exemplo, uma única componente de onda regular poderia ter a mesma energia do espectro teórico, mas isto não significa que esta onda representa o carregamento gerado por um mar irregular, que teoricamente é composto pela superposição de infinitas componentes de onda de um espectro teórico; com isto, a resposta dinâmica do corpo submetido a esta onda regular não estará correta.

Os modelos numéricos do presente trabalho foram construídos através da ferramenta computacional SITUA/PROSIM (JACOB, CORRÊA e COUTINHO, 2006), que incorpora em uma única estrutura de código e dados um modelo hidrodinâmico do casco acoplado a uma malha de elementos finitos para representação das linhas de ancoragem e *risers*. O programa é responsável pelo o processamento e pela execução das análises estáticas e dinâmicas não-lineares no domínio do tempo, através da integração numérica das equações de movimento da plataforma que está submetida a ação dos carregamentos ambientais.

O modelo utilizado nesse trabalho é baseado no modelo truncado equivalente de quatro linhas da P-55 utilizado para auxiliar na modelagem em ensaios em tanque oceânico, mas capaz de representar a rigidez horizontal do sistema completo.

Neste trabalho, é empregado o espectro *JONSWAP* (CHAKRABARTI, 2005; DNV, 2010) que será usado para as simulações do estudo de caso, para $H_s = 7,8\text{m}$, $T_z = 15,6\text{s}$ e Gama (parâmetro de pico) = 1.66.

Deste modo, foram realizados estudos que se baseiam em comparar os cinco diferentes procedimentos de discretização do espectro de mar já mencionados anteriormente, utilizando diferentes números de componentes de onda (número de componentes utilizada: 50, 100, 200, 400 e 600), verificando, a partir dos resultados obtidos, qual é a melhor composição (melhor custo computacional e precisão) entre número de componentes e tipos de discretização que pode ser utilizado em projetos de *risers* e ancoragens. O tempo de simulação para todos os casos que serão apresentados a seguir foi de 10800s, com intervalo de integração de 0,1s.

Os movimentos da plataforma foram calculados a partir das forças de onda de primeira e segunda ordem calculados, respectivamente, a partir de coeficientes de Haskind e Drift, gerados pelo programa WAMIT (Lee 1998); estes últimos coeficientes são responsáveis pelo cálculo das forças de deriva média e lenta (através da aproximação de Newman).

3.1 Análise dos Resultados

As figuras de 1 a 13 representam o espectro de energia do movimento de *surge* para a discretização de frequência constante com amostragem aleatória, amplitude constante, período constante e período constante com amostragem aleatória obtidos a partir das séries temporais de movimento das simulações numéricas. Nestas Figuras, pode ser observado o comportamento da resposta da 1ª e 2ª ordem, com diferentes números de componentes de onda.

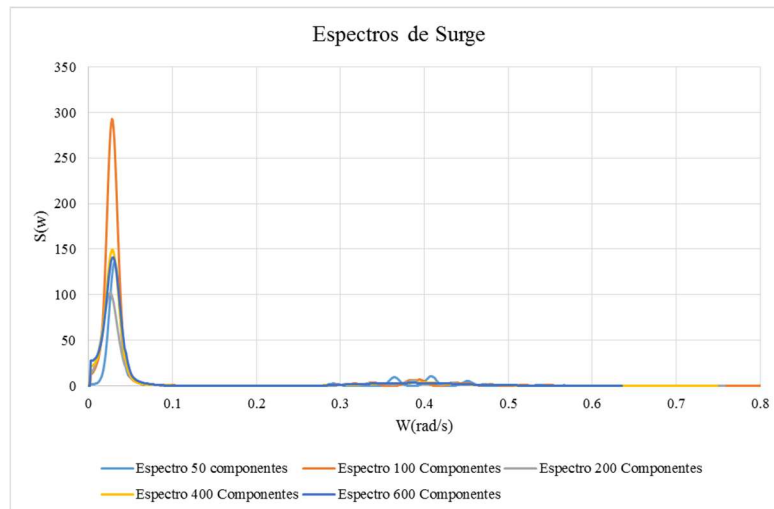


Figura 3: Espectro surge, Intervalo de Frequência Constantes, com frequência Aleatória.

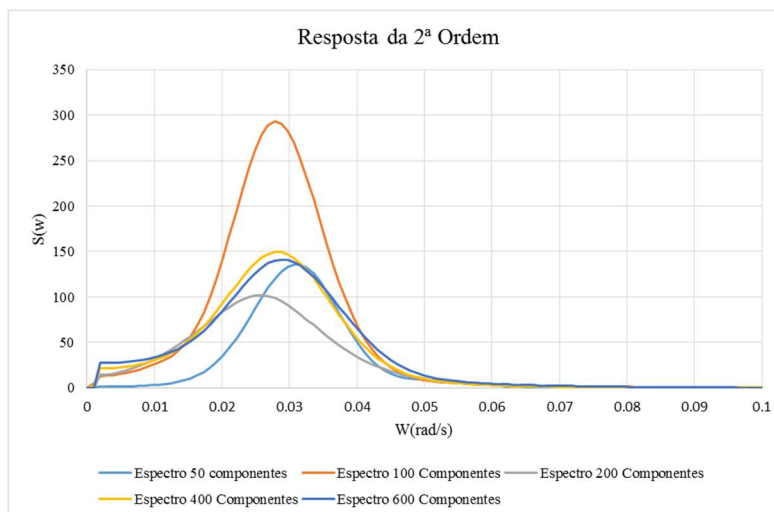


Figura 4: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Frequência Constantes, com frequência Aleatória.

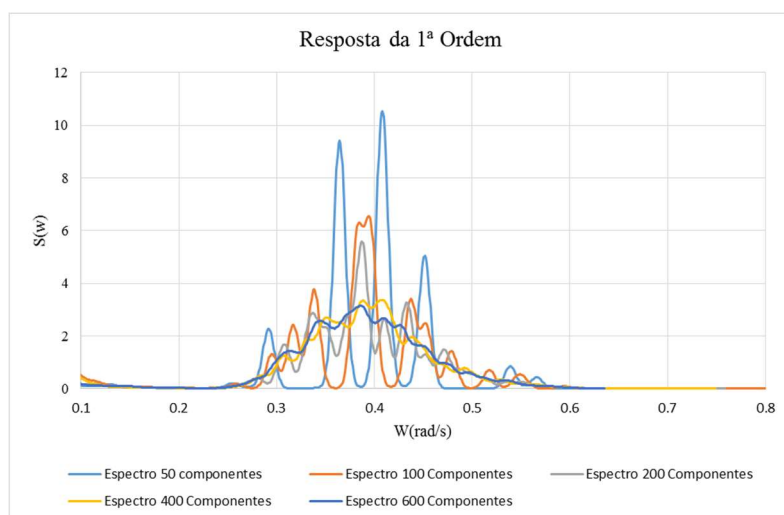


Figura 5: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Frequência Constante, com frequência Aleatória.

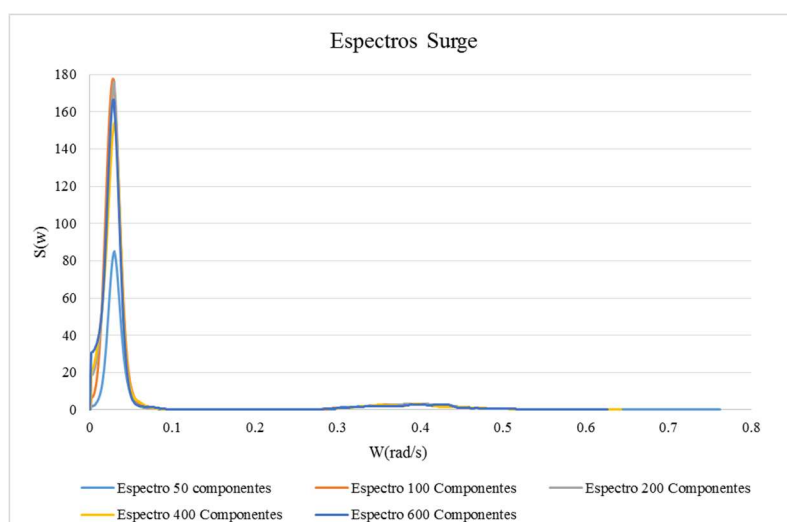


Figura 6: Espectro surge, Intervalo de Amplitude Constante.

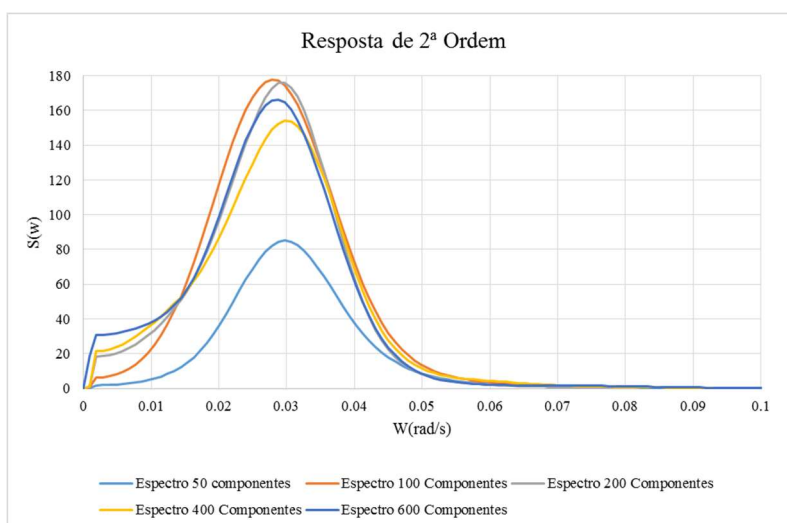


Figura 7: Resposta da 2ª Ordem, Intervalo de Amplitude Constante.

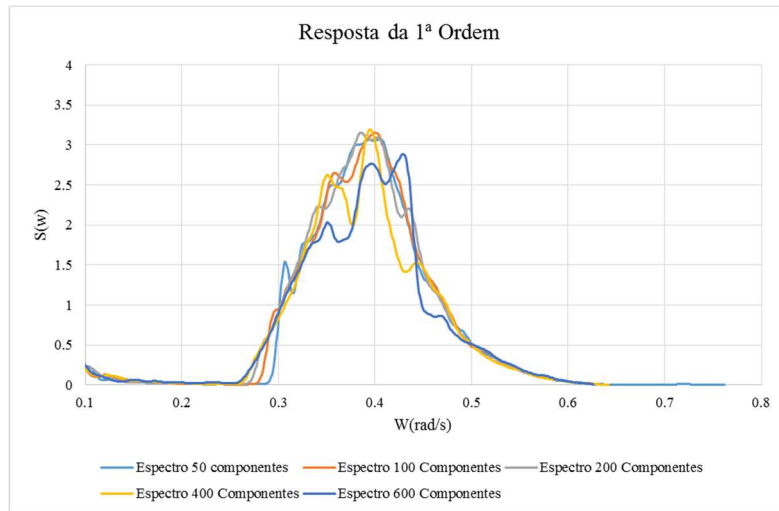


Figura 8: Resposta da 1ª Ordem, Intervalo de Amplitude Constante.

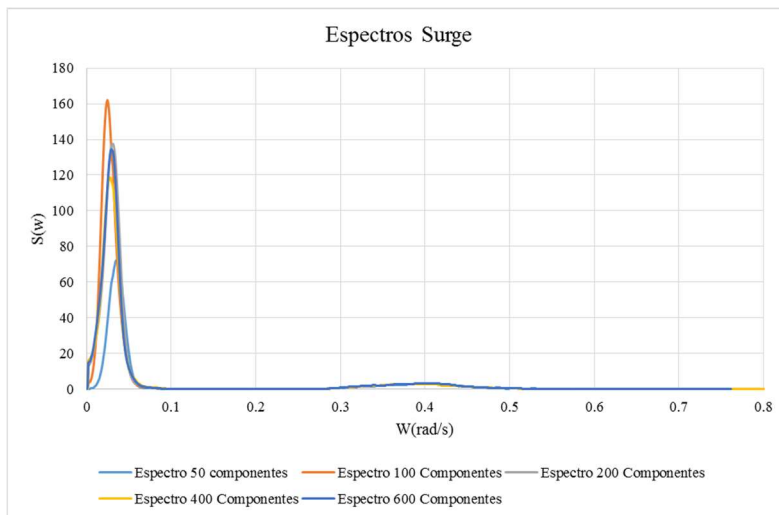


Figura 9: Espectro surge, Intervalo de Período Constante.

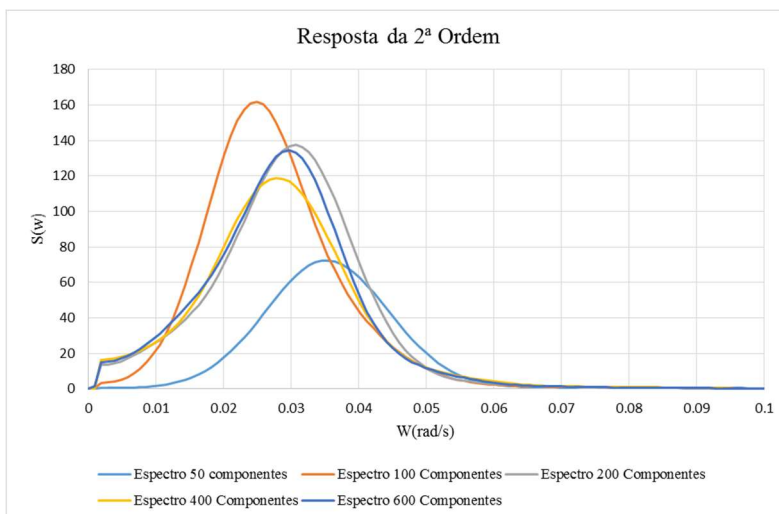


Figura 10: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Período Constante.

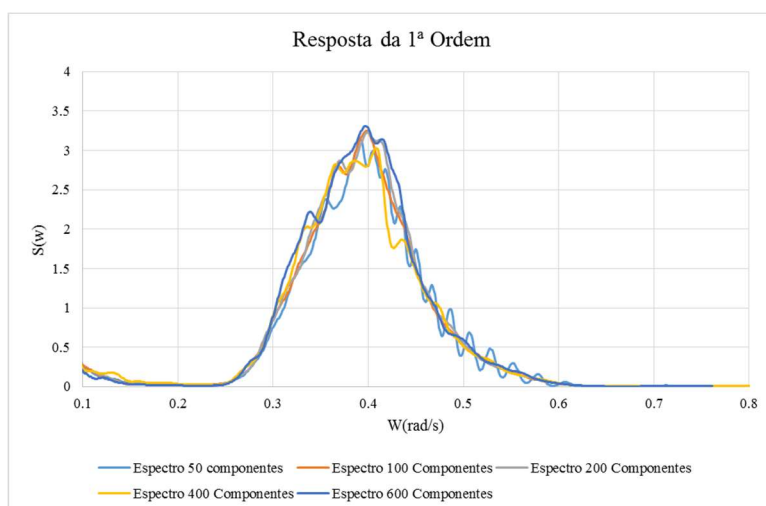


Figura 11: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Período Constante.

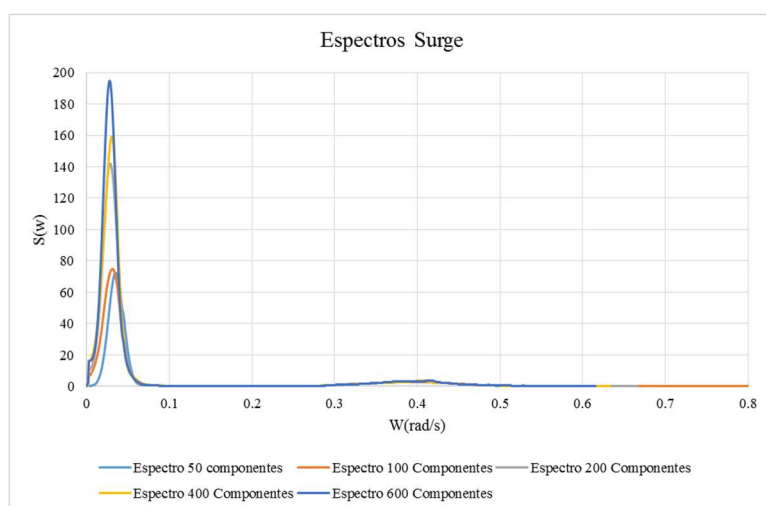


Figura 12: Espectro surge, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.

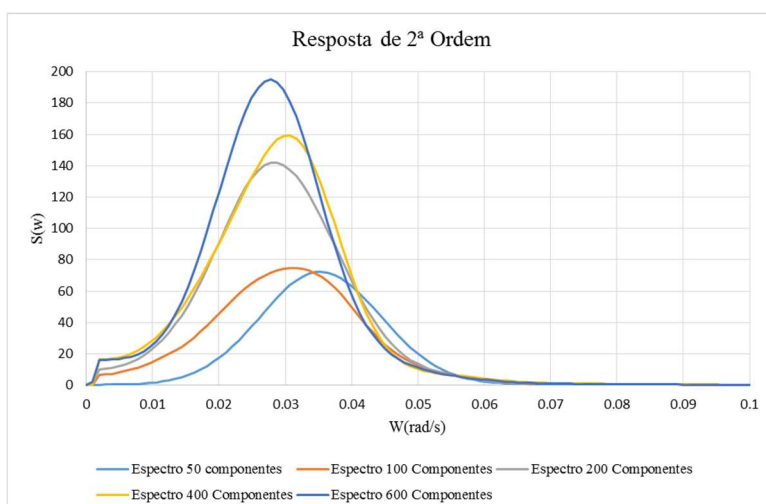


Figura 13: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.

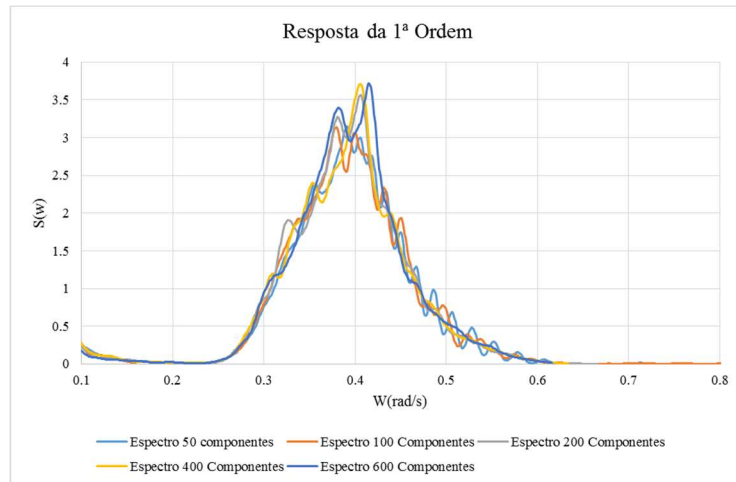


Figura 14: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.

A seguir, na Tabela 1, serão apresentados alguns resultados estatísticos (média, desvio padrão, extremos de Weibull-Tail) de pós-processamento das séries temporais de movimento de 10800 segundos geradas a partir das diferentes técnicas de discretização apresentadas.

Na Tabela 2 são apresentadas as diferenças percentuais dos resultados estatísticos, utilizando como base de comparação o parâmetro de 600 componentes de onda do espectro.

Tabela 1: Estatísticas de Surge.

Surge	Número de Componentes	Desvio Baixa frequência	Desvio Alta frequência	Extremos - Máximos	Extremos - Mínimos	Média	Desvio Padrão
Frequência Constante Amostragem Aleatória	50	1.59	0.66	7.17	-2.5	2.41	1.67
	100	2.37	0.65	10.71	-5.4	2.48	2.37
	200	1.64	0.65	8.59	-2.98	2.39	1.84
	400	1.90	0.65	9.83	-3.62	2.40	1.87
	600	1.92	0.65	11.16	-4.15	2.44	2.14
Amplitude Constante	50	1.33	0.64	7.43	-2.02	2.47	1.49
	100	2.02	0.65	10.04	-4.02	2.50	2.12
	200	1.96	0.65	10.62	-3.92	2.44	2.01
	400	1.93	0.62	10.04	-3.34	2.45	1.89
	600	1.97	0.62	10.27	-3.97	2.47	1.91
Período Constante	50	1.30	0.64	7.54	-2.42	2.64	1.50
	100	1.86	0.65	9.98	-4.02	2.53	1.92
	200	1.81	0.66	10.33	-3.66	2.44	2.01
	400	1.72	0.65	9.33	-2.81	2.45	1.89
	600	1.78	0.67	10.08	-4.15	2.45	1.90
Período Constante Amostragem Aleatória	50	1.22	0.63	7.54	-2.42	2.66	1.33
	100	1.43	0.64	7.78	-2.78	2.54	1.64
	200	1.85	0.65	9.82	-4.17	2.49	2.05
	400	1.93	0.65	10.21	-4.29	2.44	2.00
	600	2.08	0.66	10.07	-4.11	2.46	2.08

Tabela 2: Diferença Percentual do Resultado Estatístico de Surge.

Diferenças Percentuais							
Surge	Número de Componentes	Desvio Baixa frequência	Desvio Alta frequência	Extremos - Máximos	Extremos - Mínimos	Média	Desvio Padrão
Frequência Constante Amostragem Aleatória	50	17.34	-1.98	35.75	39.76	1.24	22.10
	100	-22.94	-0.21	4.03	-30.12	-1.45	-10.64
	200	14.79	0.72	23.03	28.19	2.19	13.99
	400	1.45	0.15	11.92	12.77	1.56	12.64
	600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Amplitude Constante	50	32.44	-3.95	27.65	49.12	-0.26	21.88
	100	-2.34	-4.70	2.24	-1.26	-1.21	-11.10
	200	0.56	-5.52	-3.41	1.26	0.93	-5.43
	400	2.27	-0.55	2.24	15.87	0.81	0.78
	600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Período Constante	50	26.90	4.81	25.20	41.69	-7.97	21.17
	100	-4.52	3.07	0.99	3.13	-3.55	-1.05
	200	-1.75	1.89	-2.48	11.81	0.11	-5.71
	400	2.93	3.20	7.44	32.29	-0.02	0.52
	600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Período Constante Amostragem Aleatória	50	41.54	4.43	25.12	41.12	-8.14	35.91
	100	31.16	2.95	22.74	32.36	-3.02	20.96
	200	10.92	1.25	2.48	-1.46	-1.03	1.16
	400	7.47	2.05	-1.39	-4.38	0.66	3.81
	600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

A seguir, a Tabela 3 apresenta os resultados estatísticos de tração da linha 2 do modelo numérico estudado, levando em consideração o movimento completo, de primeira e segunda ordem.

Por fim a Tabela 4 apresenta a comparação dos custos computacionais referente aos diferentes tipos de discretização.

Pode-se perceber de acordo com esta tabela que para diferentes tipos de discretização com o mesmo número de componentes nem sempre possui o mesmo custo computacional, visto que diferentes séries de elevações podem implicar em diferentes esforços sobre a plataforma, afetando um pouco o número de iterações necessárias para que as linhas do sistema, modelados por elementos finitos, atinjam convergência a cada intervalo de tempo.

A partir de todos os resultados apresentados nesse estudo, pode-se concluir que para a resposta de 1ª ordem as melhores discretizações são a de período constante e de período constante com amostragem aleatória, pois deram resultados precisos com apenas 50 componentes de onda, tendo assim um baixo custo computacional, como será apresentado mais adiante.

No entanto, para a resposta de 2ª ordem a melhor discretização foi a de amplitude constante, pois o resultado com menor custo computacional e com boa precisão já se deu com 100 componentes de onda.

O método de integração com intervalo de amplitude constante melhora a discretização da região com maior energia no espectro de onda permitindo uma melhor representação do efeito de segunda ordem. No entanto, a qualidade da resposta de movimento de primeira ordem vai depender do cruzamento entre o espectro de onda e o RAO de movimento da unidade flutuante. No caso da P-55, este cruzamento ocorre em uma região onde a energia da onda é menor e,

portanto, o intervalo de frequência é maior (para manter a amplitude constante), prejudicando uma adequada representação da resposta de movimento de primeira ordem.

Em análises onde os movimentos totais, de primeira e segunda ordem, são importantes para o projeto, naturalmente, apenas um método de discretização deve ser adotado. Neste caso, recomenda-se o uso de período constante com 200 componentes de onda, que além de garantir melhor qualidade dos resultados estatísticos, foi capaz de representar adequadamente a forma do espectro com o menor custo computacional.

Tabela 3: Estatística da Tração da Linha 2.

Estatística da Tração das linhas				Diferenças Percentuais - Estatística da Tração das linhas			
	Número de Componentes	Extremos - Mínimos	Extremos - Máximos		Número de Componentes	Extremos - Mínimos	Extremos - Máximos
Amplitude Constante	50	7421.30	8461.35	Amplitude Constante	50	-2.71	3.47
	100	7198.82	8740.49		100	0.37	0.29
	200	7207.44	8789.53		200	0.25	-0.27
	400	7286.76	8763.20		400	-0.84	0.03
	600	7225.79	8765.80		600	0.00	0.00
Frequência Cte. Amostragem aleatória	50	7352.26	8435.82	Frequência Cte. Amostragem aleatória	50	-2.49	4.80
	100	7041.93	8821.19		100	1.84	0.45
	200	7304.27	8587.39		200	-1.82	3.09
	400	7229.81	8723.87		400	-0.78	1.55
	600	7173.98	8861.2		600	0.00	0.00
Período Constante	50	7375.55	8467.43	Período Constante	50	-2.41	3.27
	100	7217.35	8740.85		100	-0.22	0.15
	200	7244.66	877.03		200	-0.60	89.98
	400	7332.94	8663.72		400	-1.82	1.03
	600	7201.76	8753.85		600	0.00	0.00
Período Constante Amostragem Aleatória	50	7446.42	8411.87	Período Constante Amostragem Aleatória	50	-3.53	3.62
	100	7340.97	8495.58		100	-2.06	2.66
	200	7189.56	8727.58		200	0.04	0.01
	400	7178.89	8760.97		400	0.19	-0.38
	600	7192.52	8728.14		600	0.00	0.00

Tabela 4: Custos computacionais.

Componentes	Custo Computacional - Freq. Cte. Amostragem Aleatória	Custo Computacional - Amplitude Constante	Custo Computacional - Período Constante	Custo Computacional - Período Cte. Amostragem Aleatória
	Tempo (min)	Tempo (min)	Tempo (min)	Tempo (min)
50	10	9	10	11
100	17	17	18	19.5
200	43	37	39	39
400	98	92	99	93
600	209	116	127	210

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo estudar a influência do número de componentes de onda e o tipo de discretização em uma plataforma semi-submersível, buscando minimizar o número de componentes de onda para fazer com que as simulações tenham boa qualidade com baixo custo computacional.

Além disso, este estudo permitiu isolar a qualidade da resposta de movimento primeira e segunda ordem para diferentes números de componentes de onda e tipos de discretização, bem como a influência na resposta de tração das linhas em uma simulação numérica. Observando que as trações foram avaliadas através dos movimentos combinados de primeira e segunda ordem.

Levando em consideração todas as análises expostas no decorrer do estudo desse trabalho, pode-se chegar em algumas conclusões:

- . Analisando o número de componentes utilizado, observou-se que a partir de 200 componentes, os resultados de movimento e tração se mostraram adequados, pois se aproximaram mais dos resultados obtidos com 600 componentes.
- . Com base nos resultados expostos, a discretização por períodos constantes foi a que gerou melhores resultados com um menor número de componentes de onda.
- . Quanto aos resultados da tração da linha de ancoragem, o cenário se repete, reafirmando que as discretizações de período constante apresentam resultados satisfatórios para a proposta desse trabalho.

Por fim, é importante ressaltar que a P-55 é uma plataforma com alta rigidez horizontal, e sua forma contribui para que tenha pouco movimento. O uso de 100 componentes de onda discretizadas com período constante, por exemplo, não implicaria em diferenças absolutas expressivas que comprometeria o projeto do sistema de ancoragem, por exemplo.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que sejam realizados estudos semelhantes em sistemas de produção com unidades do tipo FPSO, onde efeitos de difração e de primeira ordem são mais evidentes. A partir destes novos estudos, espera-se que se possa ter a definição de um número ideal de componentes que atendam a diferentes tipos de plataformas flutuantes.

De modo geral, recomenda-se a realização de estudos paramétricos com o número de componentes de onda – utilizando componentes discretizadas por período constante – antes da execução de um projeto de ancoragem ou *risers*, que poderão demandar centenas e até milhares de simulações.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientado Fabrício Nogueira Corrêa, pela fundamental ajuda nesse estudo.

Ao órgão de fomento CAPES que de forma direta ou indireta proporcionaram esse trabalho.

Ao chefe do laboratório LAMCSO Breno Pinheiro Jacob pelo fornecimento de apoio nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API RP 2SK, **Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures**. 3 ed., American Petroleum Institute, 2005.

BAHIENSE, R.A., 2007, **Implementação e Avaliação de uma Metodologia Fortemente Acoplada para Análise de Sistemas Flutuantes Offshore**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil.

CORRÊA, F.N., JACOB, B.P., “**Semi-Coupled Scheme for the Analysis of Floating Production Systems**”. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), Nantes, France, 2013.

CORRÊA, F.N., **Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos sobre o Comportamento de Sistemas Offshore**, Dissertação de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

CHAKRABARTI, SUBRATA K. **Handbook of Offshore Engineering**, 2005.

ELLWANGER, G. B., LIMA, A. L., **Tópicos Básicos de Hidrodinâmica Aplicados a Estruturas Offshore. Notas de Aula**. Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. Brasil, 2007.

GIRON, ALDO ROBERTO CRUCES - **Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers em Plataformas Flutuantes de Produção de Petróleo**. Tese (doutorado) – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, Brasil, 2013.

JACOB, B. P.; CORRÊA, F. N.; COUTINHO, D. C. E. S. **PROSIM: Simulação numérica do comportamento de Sistemas Offshore para exploração de petróleo**. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

Lima, Diego Amorim, **Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers**. Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2011.

Lee CH. 1998. **WAMIT – A Radiation-Diffraction Panel Program for Wave-Body Interactions, User Manual**. Dept. of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, USA.