



INFLUÊNCIA DA DISCRETIZAÇÃO DE ESPECTROS DE ONDA NA RESPOSTA
DE MOVIMENTO DE PLATAFORMAS FLUTUANTES OFFSHORE

Nathalia Salles Farias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Fabrício Nogueira Corrêa

Rio de Janeiro
Novembro de 2017

INFLUÊNCIA DA DISCRETIZAÇÃO DE ESPECTROS DE ONDA NA RESPOSTA DE
MOVIMENTO DE PLATAFORMAS FLUTUANTES OFFSHORE

Nathalia Salles Farias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D. Sc.

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D. Sc.

Prof. Carl Horst Albrecht, D. Sc.

Dr. Allan Carré de Oliveira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

NOVEMBRO DE 2017

Farias, Nathalia Salles

Influência da Discretização de Espectros de Onda na Resposta de Movimento de Plataformas Flutuantes Offshore / Nathalia Salles Farias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XV, 99 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Fabrício Nogueira Corrêa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 97 - 99.

1. Discretização de espectros. 2. Linhas de Ancoragem. 3. Riser. I. Corrêa, Fabrício Nogueira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Dedicatória

“Dedico este trabalho aos meus pais David e Rosane, as minhas irmãs Juliana, Gabriela e meu companheiro Philippe Netto, e a todos aqueles que me apoiaram ao longo desta jornada.”

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais David Farias e Rosane Salles por terem sempre incentivado meu crescimento pessoal e profissional, sempre me dando todo apoio em todas as etapas da minha vida, por todo carinho e amor dedicado.

As minhas irmãs Juliana Salles Farias pelas correções, pelo incentivo e carinho, e Gabriela Salles Farias, por sempre me motivar e pelo carinho nessa caminhada.

Ao meu orientador Fabrício Nogueira Corrêa pela excelente orientação para a realização deste trabalho, motivo de exemplo pelo vasto conhecimento técnico e experiência, que me foram passados de maneira ímpar, sendo uma peça fundamental para que eu chegasse ao objetivo que agora alcanço.

Ao chefe do LAMCSO Breno Pinheiro Jacob, por ter disponibilizado o espaço no laboratório e as ferramentas que possibilitaram a realização desse trabalho.

Ao meu namorado Philippe Netto Belache Peixoto por todo carinho, pelo amor, e pela compreensão nessa etapa, e por sempre me apoiando nos momentos mais difíceis.

À minha família do coração José Carlos Belache e Vania Maria Netto, por todo o carinho e apoio nessa etapa.

Aos amigos da COPPE: Carolina Maria Nunes Bezerra, Ricardo Nunes de Souza, Aaron Amono Matala, Miguel Alfonso Calderon Ibarra, William Steven Mendez Rodriguez, Adolfo Emmanuel Correa López, por todo companheirismo e amizade nesse período.

À Capes pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INFLUÊNCIA DA DISCRETIZAÇÃO DE ESPECTROS DE ONDA NA RESPOSTA DE MOVIMENTO DE PLATAFORMAS FLUTUANTES OFFSHORE

Nathalia Salles Farias

Novembro/2017

Orientador: Fabrício Nogueira Corrêa

Programa: Engenharia Civil

Com o avanço das companhias de petróleo na exploração e produção em águas cada vez mais profundas, se insere a necessidade crescente de novas tecnologias, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de plataformas, sistemas de ancoragem e de *Risers* para essas condições. Ao mesmo tempo, os simuladores numéricos vêm incorporando novas formulações matemáticas validadas com ensaios experimentais para representar de forma cada vez mais realista o comportamento destes sistemas, sempre buscando um balanço entre precisão e custo computacional.

Neste contexto, esse trabalho busca avaliar através de estudos paramétricos a influência de procedimentos de discretização de espectros de mar em projetos de ancoragem e *risers*; mais especificamente, na resposta de movimento de primeira e segunda ordem de unidades flutuantes de produção e na resposta dos esforços das linhas de ancoragem e *risers*. Os parâmetros estudados envolvem o número de componentes de onda bem como diferentes tipos de discretização de espectro.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE INFLUENCE OF THE DISCRETIZATION OF WAVES IN THE OFFSHORE
FLOATING PLATFORM MOVIMENT RESPONSE

Nathalia Salles Farias

November/2017

Advisor: Fabrício Nogueira Corrêa

Department: Civil Engineering

With the advancement of oil companies in exploration and production in ever deeper waters, there is a growing need for new technologies, especially in the development of platforms, mooring 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 looking for a balance between precision and computational cost.

In this context, this work presents through parametric studies the influence of discretization procedures of sea spectrum in design of mooring lines 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.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto e Motivação	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	SISTEMAS OFFSHORE	4
2.1	Introdução	4
2.2	Plataformas	4
2.2.1	Plataforma Fixa	5
2.2.2	Plataformas Flutuantes	6
2.3	Configuração de Ancoragem	10
2.3.1	Catenária	10
2.3.2	Taut Leg	11
2.4	Sistemas de Ancoragem.....	12
2.4.1	Amarração com Aproamento Fixo – SM.....	12
2.4.2	Ancoragem de Ponto Único – SPM	13
2.4.3	Posicionamento Dinâmico – DP	15
2.5	Riser	16
2.5.1	<i>Riser</i> Rígido	17
2.5.2	<i>Riser</i> Flexível	17
2.5.3	Diferentes Configurações dos <i>Risers</i>	18
3	FORMULAÇÕES DE ANÁLISE.....	19
3.1	Introdução	19
3.2	Tipos de Modelo Hidrodinâmico de Casco	19
3.3	Formulação Desacoplada.....	22
3.4	Formulação Acoplada	23
3.4.1	Formulação Fracamente Acoplada.....	24

3.4.2	Formulação Fortemente Acoplada	25
3.5	Formulações Híbridas	26
4	REPRESENTAÇÃO DE ONDA	28
4.1	Introdução	28
4.2	Representação espectral	32
4.3	Espectro de <i>Jonswap</i>	34
4.4	Discretização do Espectro de Onda	35
4.5	Forças Geradas Pelas Ondas	37
4.5.1	Formulação de <i>Morison</i>	37
4.5.2	Formulação de <i>Froude-Krylov</i>	39
4.5.3	Modelo de Difração / Radiação	40
4.6	Tipos de Método de Discretização.....	47
4.6.1	Intervalos de Frequência Constantes, com Frequência Aleatória ...	47
4.6.2	Amplitudes Constantes	48
4.6.3	Intervalos de Períodos Constantes	49
4.6.4	Intervalos de Períodos Constantes, com Amostragem Aleatória....	49
5	METODOLOGIAS DE PROJETO.....	51
5.1	Introdução	51
5.2	Metodologia Desacoplada.....	51
5.3	Metodologia Acoplada.....	53
5.4	Metodologia Híbrida.....	54
5.5	Projeto Integrado de Ancoragem e <i>Risers (PrIAR)</i>	55
6	ESTUDOS DE CASO	59
6.1	Introdução	59
6.2	Influência do Tipo De Discretização por Número de Componentes de Onda.....	63
6.2.1	Intervalos de Frequência Constantes, Com amostragem Aleatória	64

6.2.2	Amplitudes Constantes	68
6.2.3	Intervalos de Períodos Constantes	73
6.2.4	Intervalos de Períodos Constantes, com Amostragem Aleatória....	77
6.3	Influência do Número de Componentes de Onda por Tipo de Discretização	81
6.3.1	50 Componentes de Onda	82
6.3.2	100 Componentes de Onda	84
6.3.3	200 Componentes de Onda	85
6.3.4	400 Componentes de Onda	86
6.3.5	600 Componentes de Onda	88
6.4	Resultado Estatístico do Movimento	89
6.5	Resultado Estatístico da Tração	92
6.6	Custo Computacional.....	93
7	CONCLUSÃO	94
7.1	Conclusões do Trabalho Proposto	94
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	96
8	REFERÊNCIA	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Plataforma Fixa. [4]	5
Figura 2: Plataforma Auto elevatória. [4].....	6
Figura 3: Plataforma Spar-Buoy em operação.	7
Figura 4: Tipos de Spar-Buoy.	7
Figura 5: Plataforma Semissubmersível. [6]	8
Figura 6: FPSO. [7]	9
Figura 7: Plataforma com pernas tracionadas (TLP) - Plataforma com pernas tracionadas (TLP) durante o transporte. [2].....	10
Figura 8: Ancoragem em catenária convencional e Taut – Leg.	11
Figura 9: Exemplo de Amarração em Quadro de Ancoragem. [5].....	12
Figura 10: Navio sistema DICAS de ancoragem. [2].....	13
Figura 11: Ancoragem com Turret.	14
Figura 12: Ancoragem tipo CALM fixado com hawser e com yoke [9].....	14
Figura 13: SALM fixado com riser e yoke. [9]	15
Figura 14: Posicionamento Dinâmico. [9].....	16
Figura 15: Vista geral das camadas de uma linha flexível. [2].....	17
Figura 16: Configurações de <i>risers</i> flexível. [10].....	18
Figura 17: Configuração Híbrida de <i>Risers</i> . [10]	18
Figura 18: Denominação dos seis graus de liberdade de um corpo flutuante. [9].....	19
Figura 19: Etapa de Análise Hidrodinâmica da UF (Metodologia Desacoplada). [5] ...	23
Figura 20: Esquema da Metodologia Acoplada. [5].....	24
Figura 21: Representação de uma Onda Regular. [2].....	29
Figura 22: Representação de uma onda Irregular. [11]	29
Figura 23: Modelo Matemático da Representação das ondas do mar. [2]	30
Figura 24: Composição do espectro de mar através de suas componentes harmônicas. [15]	35
Figura 25: Discretização do espectro.....	36
Figura 26: Elevação de Altura de Onda.....	48
Figura 27: Elevação de Altura de Onda.....	48
Figura 28: Elevação da Altura de Onda.....	49
Figura 29: Elevação da Altura de Onda.....	50

Figura 30: Fluxograma da metodologia PriAR [20].....	57
Figura 31: Imagem da plataforma P-55 e do modelo truncado de 4 linhas utilizado. [7]	60
Figura 32: Espectro de Jonswap.	61
Figura 33: RAO de força do Surge.....	61
Figura 34: RAO de força do Heave.....	62
Figura 35: RAO de força do Pitch.....	62
Figura 36: Altura de Onda, 50 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.	64
Figura 37: Altura de Onda, 100 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.	64
Figura 38: Altura de Onda, 200 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.	65
Figura 39: Altura de Onda, 400 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.	65
Figura 40: Altura de Onda, 600 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.	65
Figura 41: Espectro surge, Intervalo de Frequência Constantes, com frequência Aleatória.	66
Figura 42: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Frequência Constantes, com frequência Aleatória.	66
Figura 43: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Frequência Constantes, com frequência Aleatória.	67
Figura 44: Espectro Heave, Intervalo de Frequência Cte. Com Amostragem Aleatória.....	67
Figura 45: Espectro Pitch, Frequência Cte. Amostragem Aleatória.....	68
Figura 46: Altura de Onda, 50 Componentes, Amplitude Constante.....	68
Figura 47: Altura de Onda, 100 Componentes, Amplitude Constante.....	69
Figura 48: Altura de Onda, 200 Componentes, Amplitude Constante.....	69
Figura 49: Altura de Onda, 400 Componentes, Amplitude Constante.....	69
Figura 50: Altura de Onda, 600 Componentes, Amplitude Constante.....	70
Figura 51: Espectro surge, Intervalo de Amplitude Constante.....	70
Figura 52: Resposta da 2ª Ordem, Intervalo de Amplitude Constante.....	71
Figura 53: Resposta da 1ª Ordem, Intervalo de Amplitude Constante.....	71
Figura 54: Espectro Heave, Amplitude Constante.	72

Figura 55: Espectro Pitch, Amplitude Constante.	72
Figura 56: Altura de Onda, 50 Componentes, Período Constante.....	73
Figura 57: Altura de Onda, 100 Componentes, Período Constante.	73
Figura 58: Altura de Onda, 200 Componentes, Período Constante.	74
Figura 59: Altura de Onda, 400 Componentes, Período Constante.	74
Figura 60: Altura de Onda, 600 Componentes, Período Constante.	74
Figura 61: Espectro surge, Intervalo de Período Constante.	75
Figura 62: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Período Constante.	75
Figura 63: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Período Constante.	76
Figura 64: Espectro Heave, Período Constante.	76
Figura 65: Espectro Pitch, Período Constante.	77
Figura 66: Altura de Onda, 50 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.	77
Figura 67: Altura de Onda, 100 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.	78
Figura 68: Altura de Onda, 200 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.	78
Figura 69: Altura de Onda, 400 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.	78
Figura 70: Altura de Onda, 600 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.	79
Figura 71: Espectro surge, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.	79
Figura 72: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.	80
Figura 73: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.	80
Figura 74: Espectro Heave, Período Constante Amostragem Aleatória.	81
Figura 75: Espectro Pitch, Período Constante Amostragem Aleatória.	81
Figura 76: Espectro com 50 Componentes de Onda.	82
Figura 77: Resposta de 2ª Ordem, com 50 Componentes de Onda.	83
Figura 78: Resposta de 1ª Ordem, com 50 Componentes de Onda.	83
Figura 79: Espectro com 100 Componentes de Onda.	84
Figura 80: Resposta de 2ª Ordem, com 100 Componentes de Onda.	84

Figura 81: Resposta de 1ª Ordem, com 100 Componentes de Onda.....	85
Figura 82: Espectro com 200 Componentes de Onda.	85
Figura 83: Resposta de 2ª Ordem, com 200 Componentes de Onda.....	86
Figura 84: Resposta de 1ª Ordem, com 200 Componentes de Onda.....	86
Figura 85: Espectro com 400 Componentes de Onda.	87
Figura 86: Resposta de 2ª Ordem, com 400 Componentes de Onda.....	87
Figura 87: Resposta de 1ª Ordem, com 400 Componentes de Onda.....	87
Figura 88: Espectro com 600 Componentes de Onda.	88
Figura 89: Resposta de 2ª Ordem, com 600 Componentes de Onda.....	88
Figura 90: Resposta de 1ª Ordem, com 600 Componentes de Onda.....	89
Figura 91: Desvio Padrão.	90
Figura 92: Médias.....	90

LISTA DA TABELAS

Tabela 1: Estatísticas de Surge.	89
Tabela 2: Diferença Percentual do Resultado Estatístico de Surge.	91
Tabela 3: Estatística da Tração das Linhas.	92
Tabela 4: Custos computacionais.	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

Ao longo dos anos, a exploração e produção de petróleo e gás em campos localizados no fundo do mar vem se acelerando. Com isso, os estudos que tratam dos processos de inovações tecnológicas voltados à exploração e à produção de petróleo em águas profundas evidenciam as complexidades envolvidas na geração e na aplicação de tecnologias naquelas atividades.

Foram realizados diversos desenvolvimentos tecnológicos na exploração e produção de petróleo offshore, inovações essenciais ao avanço em águas profundas e ultraprofundas. São os casos de navios-sonda, de plataformas de Posicionamento Dinâmico, de árvores de natal molhadas (árvores de válvulas, instaladas no leito marinho), de equipamentos de separação dos fluxos de petróleo-gás-água no próprio leito submarino, de *risers* (dutos) flexíveis resistentes a altas pressões, da sísmica tridimensional (3-D), entre outras inovações. Foram efetivados, ainda, processos contínuos de inovações incrementais, por meio de adaptações e aprimoramentos em equipamentos e sistemas de prospecção, perfuração, extração, produção e transportes, com o objetivo de viabilizar a produção em novas áreas marítimas, solucionar problemas técnicos específicos ou reduzir custos operacionais e com investimentos.

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.

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 [1].

O mar pode ser definido por ondas aleatórias, em geral representadas pela superposição linear de várias ondas regulares, com diferentes valores de período, amplitude e fase. Em projetos de sistemas offshore, a energia do mar é representada através de espectros teóricos. A partir deles, deve ser definido um procedimento de discretização para a geração de ondas irregulares. Essas ondas são representadas numericamente, envolvendo procedimentos de discretização de espectros, tais como discretização por período constante, frequência constante ou amplitude constante, que dependem fortemente de um número arbitrado de componentes, cuja escolha deve ser feita de forma cuidadosa para não elevar o custo computacional da análise e, ao mesmo tempo, garantir precisão dos resultados.

A necessidade de custo computacional reduzido justifica-se pelos prazos de projeto apertados que são enfrentados pelas equipes técnicas, o que inviabiliza a análise criteriosa de todos os casos de carregamento possíveis desde as fases iniciais.

1.2 Objetivo

Neste sentido, o presente trabalho terá o intuito de investigar a influência de procedimentos de discretização de espectros na resposta de primeira e segunda ordem de unidades de produção offshore. Portanto, será possível definir um número ideal de componentes de onda e o procedimento de discretização mais adequado para ser aplicado em projetos de *risers* e ancoragem.

Embora a influência do procedimento de discretização será avaliada neste trabalho através da formulação de análise acoplada, as conclusões sobre o procedimento de discretização de primeira ordem poderão ser estendidas a formulação desacoplada.

Para realizar os estudos numéricos dessa dissertação será utilizado o programa SITUA-Proxim desenvolvido pela LAMCSO/PEC/COPPE/UFRJ.

1.3 Estrutura da dissertação

Inicialmente, os Capítulos 2 a 5 descrevem a formulação incorporada nos procedimentos de análise que compõem as metodologias consideradas nesta Dissertação.

No capítulo 2, é feita uma descrição geral dos sistemas offshore que são necessários ao entendimento deste trabalho, como os tipos de plataformas, ancoragens e *Risers*.

No capítulo 3 faz uma revisão dos tipos de formulações de análises do projeto empregados.

O capítulo 4 faz-se uma descrição de representação de um espectro de mar, abordando os diferentes tipos de discretização de espectro, e descrevem-se os tipos de procedimentos de discretização utilizados nesse trabalho. Também abordam-se as forças geradas pelas ondas.

O capítulo 5 apresenta a metodologia de projeto.

No capítulo 6 é apresentado o estudo de casos e os resultados são apresentados e discutidos.

No capítulo 7, são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho e são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo 8, as referências bibliográficas.

2 SISTEMAS OFFSHORE

2.1 Introdução

Neste capítulo haverá uma breve descrição dos sistemas offshore para possibilitar a melhor compreensão dos que serão estudados nesta dissertação, também se familiarizando, com algumas denominações e conceitos básicos da área offshore. Apresenta também os diferentes tipos e configurações de sistemas de ancoragem e *risers*.

2.2 Plataformas

No ano de 1947, foram construídas as duas primeiras plataformas metálicas, já com o conceito de Jaqueta, pela empresa Superior Oil Company. Esse conceito consistiu em fabricar em canteiro uma estrutura de travejamento que fosse colocada no local de instalação por guindaste e que servisse inicialmente de guia para a cravação das estacas e, posteriormente, travejamento para estas abaixo da linha d'água, provendo dessa maneira considerável resistência às ações ambientais. Essas estruturas metálicas mudaram o rumo da construção offshore, pois possibilitaram a instalação muito mais rápida do estaqueamento ao mesmo tempo em que abriram o caminho para lâminas d'água mais profundas.

Posteriormente, foram instaladas no Golfo do México, em águas de até 60 metros de profundidade. Entre 1950 e 1960, as plataformas já produziam em águas de até 100 metros, chegando, anos depois, para profundidades de 400 e 500 metros. Na década de 50, só se explorava a plataforma continental no golfo do México; dez anos depois, a exploração já era realizada desde a Austrália até o Alaska. [2]

Com a necessidade crescente de se produzir mais petróleo para atender a demanda e a descoberta de campos petrolíferos em águas cada vez mais profundas, houve a necessidade de se buscar soluções que possibilitassem a exploração destes campos. Com isto surgiram diferentes concepções de plataformas. Pode-se dividir estas concepções segundo sua geração. A primeira e a segunda geração de plataformas consistiram em plataformas fixas, como, jaquetas e plataformas de gravidade. Pode-se considerar o

sistema de produção flutuante como a terceira geração das plataformas, as quais representam uma mudança na filosofia de exploração de petróleo.

Por plataforma flutuante entende-se uma estrutura complacente que é posicionada através de um sistema de ancoragem. As estruturas complacentes caracterizam-se por apresentarem grandes deslocamentos sob a ação das cargas ambientais.

As plataformas podem ter por objetivos a perfuração (drilling) ou a produção (production), e ainda o armazenamento de hidrocarbonetos (storage) ou desempenhar diversas outras atividades de apoio a produção de petróleo offshore, como nas intervenções em poços de petróleo. As funções citadas, que podem ser reunidas em uma única plataforma, definem as modalidades principais de plataformas. Quanto à estrutura de suporte, as plataformas podem ser fixas (jacket), flutuantes (floating) ou auto elevatórias (jack-up). [3]

2.2.1 Plataforma Fixa

As plataformas fixas funcionam como estruturas rígidas, que são fixadas no fundo do mar por um sistema de estacas cravadas. Elas são feitas de aço e concreto ou aço ou concreto. Abaixo serão apresentadas as plataformas fixas.



Figura 1: Plataforma Fixa. [4]

2.2.1.1 Plataforma Jaqueta

Esse tipo de plataforma é construída com tubulações de aço fixadas no fundo do mar por meio de estacas. Sua estrutura é projetada para uma lamina d'água de até 300 metros de profundidade, mas existem exceções.

2.2.1.2 Plataforma Autoelevatória

A plataforma Jack-up é auto elevatória e equipada com estruturas de apoio (rig legs), que são descidas lentamente até o fundo do mar, onde são fixadas por estacas no solo. Essa plataforma é destinada a perfuração de poços em águas rasas, com até 130 metros de lamina d'água.



Figura 2: Plataforma Auto elevatória. [4]

Conforme foram sendo descobertos novos reservatórios de petróleo em lâminas d'água mais profundas (500m a 1000m), constatou-se que a frequência natural deste tipo de plataforma se aproximava perigosamente da frequência de excitação causada pelas ondas. Isso poderia fazer com que o sistema entrasse em ressonância, o que ocasionaria um desastre de grandes proporções. Para evitar este provável problema, seria necessário construir uma estrutura muito rígida, o que mostrou-se economicamente inviável.

Então, para compor novas alternativas na exploração de petróleo em águas profundas, foram introduzidos os sistemas flutuantes ancorados no fundo do mar por meio de cabos. Estes sistemas são descritos nos itens a seguir.

2.2.2 Plataformas Flutuantes

2.2.2.1 Plataforma SPAR

Plataforma SPAR consiste de um único cilindro vertical de aço de grande diâmetro, é ancorada no fundo do mar por sistema Taut Leg, e opera com um calado de profundidade constante de cerca de 200 metros. Com isso, gera apenas pequenos movimentos verticais e, conseqüentemente, possibilita a utilização de *risers* rígidos de

produção. Sua sustentação é garantida por tanques de flutuação. A plataforma SPAR em sua planta acomoda as instalações para processamento de petróleo, geração de energia e acomodação da tripulação. [5]



Figura 3: Plataforma Spar-Buoy em operação.

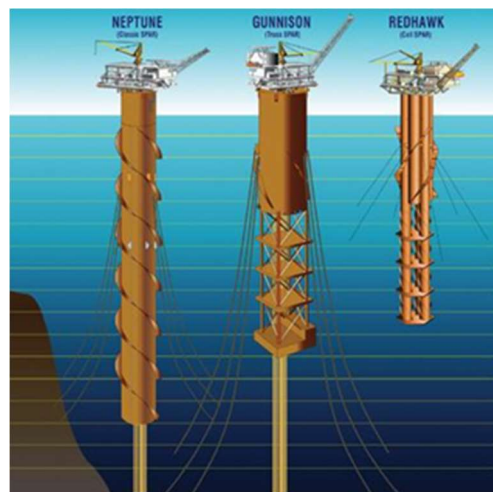


Figura 4: Tipos de Spar-Buoy.

2.2.2.2 Plataforma Semissubmersível

As plataformas semissubmersíveis de produção ficam fixas em um mesmo local em torno de vinte anos e não armazenam óleo, ao contrário dos FPSOs, que serão vistos mais adiante. Estas geralmente são denominadas semissubmersíveis de produção. Já as plataformas de perfuração ficam por um período (curto) determinado numa locação, e são geralmente denominadas MODU (Mobile Offshore Drilling Unit). A sua estrutura fica apoiada sobre as colunas. Este tipo de plataforma se apoia em flutuadores submarinos, cuja profundidade pode ser alterada através do bombeio de água para o tanque de lastro.

É mantida estacionária no mar pelo sistema de posicionamento dinâmico, devido aos sensores de posição com uso do GPS, e também por ancoragens.

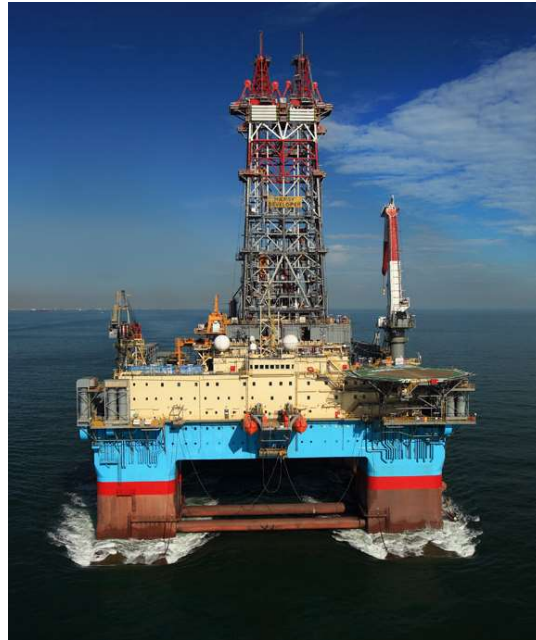


Figura 5: Plataforma Semissubmersível. [6]

2.2.2.3 Navio Plataforma FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*)

Com a descoberta de petróleo em lâminas d'água cada vez mais profundas, a tecnologia para exploração desse óleo tende a se aproximar cada vez mais da indústria naval. Além das necessidades de se ter uma unidade de produção localizada em águas profundas, existe o desafio de como escoar a produção, considerando as distâncias da costa e a profundidade do mar.

Para atender a estes desafios surgiu a alternativa dos FPSO's (*Floating Production Storage Offloading*). Este tipo de unidade estacionária é construída adaptando o casco de navio petroleiro ou de um casco novo para esse fim. Um navio ancorado, que suporta em seu convés uma planta de processo, armazena o óleo produzido e ainda permite o escoamento da produção para outro navio, chamado aliviador, que é periodicamente amarrado no FPSO para receber e transportar o óleo até os terminais petrolíferos [Bogarin]. Também temos a FPWSO, que dispõe de equipamentos para intervenções no poço, como substituição de tubos de produção, estimulação do reservatório e operação de perfuração. [5]



Figura 6: FPSO. [7]

2.2.2.4 Plataforma TLP (Tension Leg Platform)

A TLP (Tension Leg Platform) é destinada para perfuração e produção, sendo apoiada em um sistema de boias para a flutuação, ancorada verticalmente por tendões, numa posição onde o empuxo é bem maior do que o peso, sendo a diferença absorvida por um conjunto de tendões tracionados com grande rigidez vertical. As boias consistem em grandes colunas com ar que suportam o peso do convés. A TLP opera com árvores de natal secas instaladas no convés, e com tubos rígidos para a condução do petróleo e gás extraídos dos poços, mas também com completação molhada. O casco da TLP é semelhante ao de uma semissubmersível e é constituído basicamente de seções tubulares retangulares horizontais (“pontoons”) e cilindros verticais enrijecidos. No entanto, os pontoons de uma TLP são bem menores do que os correspondentes de uma semissubmersível, já que o comportamento é diferenciado. A TLP é uma plataforma utilizada em águas profundas. [5]



Figura 7: Plataforma com pernas tracionadas (TLP) - Plataforma com pernas tracionadas (TLP) durante o transporte. [2]

2.3 Configuração de Ancoragem

Os sistemas flutuantes são estruturas complacentes, pois se caracterizam por apresentar grandes deslocamentos sob ação de cargas ambientais; sendo assim é necessária a utilização de um sistema de ancoragem adequado, que limite tais deslocamentos a níveis aceitáveis, atendendo as recomendações da API 2Sk [1].

O sistema de ancoragem confere à unidade flutuante a capacidade de conservar sua posição no mar e, conseqüentemente, é de fundamental importância nas características operacionais e de segurança [1].

Sistema de ancoragem é um conjunto de linhas de ancoragem compostas por diferentes materiais (amarras, cabos de aço, cabos de poliéster, cabos de nylon e etc.) e âncoras ou estacas, que transferem os esforços que agem sobre a plataforma para o solo. As principais configurações de ancoragem das plataformas flutuantes são: a catenária convencional; Taut Leg; Ancoragem Vertical [7].

2.3.1 Catenária

A ancoragem em catenária caracteriza-se por permitir maiores passeios à embarcação, sem a necessidade da utilização de âncoras com elevado poder de garra, visto que o atrito do trecho da linha apoiado no fundo do mar já absorve grande parte dos

esforços horizontais. Entretanto, pelo fato da catenária necessitar de um considerável comprimento de linhas, este tipo de ancoragem está muito suscetível à interferência com equipamentos submarinos ou outras linhas de UF's próximas.

O sistema de ancoragem em forma de catenária é constituído por trechos em cabos de aço, amarras ou uma combinação de ambos. Seu arranjo trata-se da curva obtida pela suspensão por suas extremidades de uma linha completamente flexível, quando submetida apenas a seu peso próprio, como pode ser visto na figura abaixo.

As forças que atuam sobre o cabo são as forças hidrodinâmicas, o peso submerso por unidade de comprimento e a tração na extremidade superior. [2]

2.3.2 Taut Leg

A ancoragem do tipo Taut Leg é diferente da convencional pelo fato de que ela não possui trechos apoiados sobre o leito marinho. Ela foi desenvolvida para contornar as desvantagens da catenária convencional. Apresentando um menor comprimento de linha e formando um ângulo de topo com a vertical de aproximadamente 45 graus, ela é sensivelmente menor que a convencional, o que traz benefícios.

Neste caso, como a ancoragem proporciona uma maior rigidez ao sistema, sendo o “passeio” da embarcação limitado a offsets menores (deslocamentos no plano horizontal menores), as âncoras a serem utilizadas precisam resistir a cargas mais elevadas, implicando numa fundação mais robusta.

Geralmente, as linhas são constituídas de material sintético e são estacas de sucção ou estacas torpedo, que possuem uma elevada rigidez vertical, garantindo menores offsets à UF [8] [5].

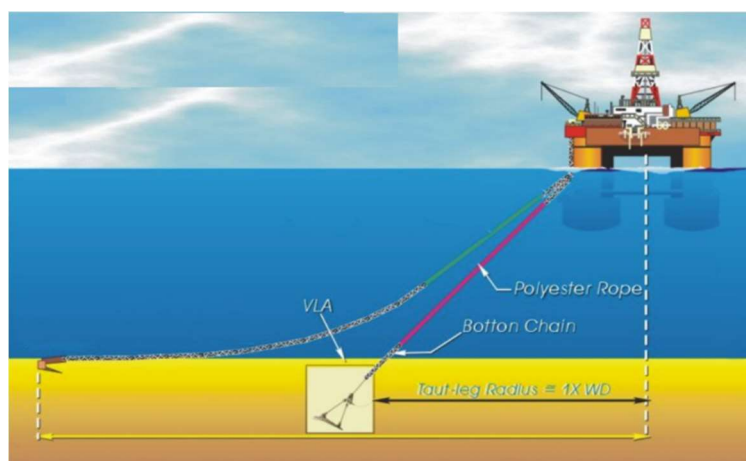


Figura 8: Ancoragem em catenária convencional e Taut – Leg.

2.4 Sistemas de Ancoragem

Os Sistemas de Ancoragem empregados em unidades flutuantes de exploração de petróleo podem ser classificados em três tipos principais:

- Amarração com Aproamento Fixo – (Spread Mooring);
- Ancoragem de Ponto Único – SPM (Single Point Mooring);
- Posicionamento Dinâmico – DP (Dynamic Positioning).

2.4.1 Amarração com Aproamento Fixo – SM

A ancoragem SM é mais frequentemente utilizada por plataformas semissubmersíveis em operações de perfuração e produção. Foi o sistema de ancoragem pioneiro empregado em plataformas flutuantes, sendo que atualmente ainda é considerado o sistema mais utilizado. Na ancoragem SM (*Spread Mooring*), as linhas de ancoragem estão posicionadas simetricamente no entorno da embarcação, de modo a resistir a carregamentos ambientais vindos de quaisquer direções. Com isso, os efeitos de cargas ambientais independem da direção de incidência sobre a plataforma semissubmersível [5]

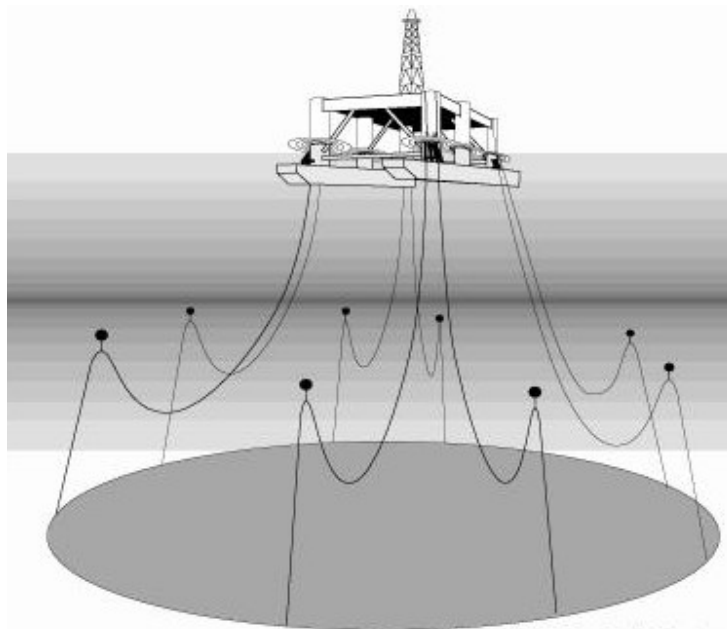


Figura 9: Exemplo de Amarração em Quadro de Ancoragem. [5]

A empresa Petrobras desenvolveu um novo conceito de ancoragem SM utilizada para a ancoragem de FPSO's na costa brasileira, na década de 90, chamada de DICAS (*Differentiated Compliance Anchoring System*) fornecendo um alinhamento parcial com

a pior direção do carregamento ambiental. Este consiste basicamente em linhas de ancoragem conectadas na popa e proa do navio. Esta ligação permite que as extremidades opostas da UF possuam diferentes rigidezes obtidas através de diferentes níveis de pré-tensões nas linhas. Esta característica do Sistema DICAS garante ao navio um aproamento a favor da direção dos carregamentos ambientais atuantes.

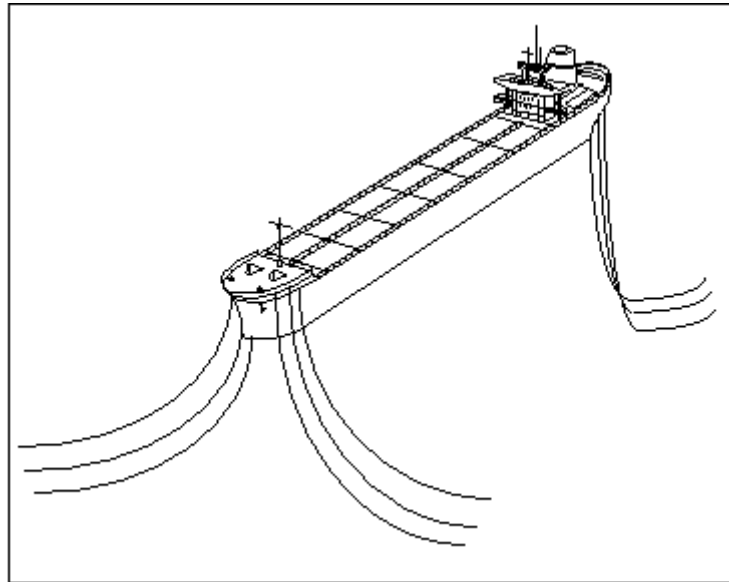


Figura 10: Navio sistema DICAS de ancoragem. [2]

2.4.2 Ancoragem de Ponto Único – SPM

A ancoragem em Ponto Único (*Single Point Mooring*) é caracterizada por concentrar todas as linhas em uma única posição na embarcação. Este sistema, que é o mais utilizado em FPSO's, é caracterizado por permitir que o navio gire livremente ao redor de suas linhas de ancoragem, favorecendo o seu alinhamento na direção de incidência dos carregamentos ambientais, reduzindo o impacto destes no casco. Existem vários tipos de ancoragem em um único ponto, sendo definidos basicamente três tipos: ancoragem com turrete, CALM (Catenary Anchor Leg Mooring) e SALM (Single Anchor Leg Mooring), que serão apresentadas nos itens subsequentes. [8]

2.4.2.1 Ancoragem Com Turret

Neste sistema as linhas de ancoragem e os *risers* são conectados a um equipamento chamado de *turret*, que permite a rotação do navio em torno do eixo do seu

núcleo. Os *turrets* podem ser montados internos ou externos, fixos ou desconectáveis à embarcação.



Figura 11: Ancoragem com Turret.

2.4.2.2 CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*)

O Sistema CALM baseia-se em uma boia de grandes dimensões que conectam as linhas e os *risers*. A amarração entre a boia e o navio é feita através de um cabo de material sintético (*hawser*) ou de uma estrutura fixa. [1]

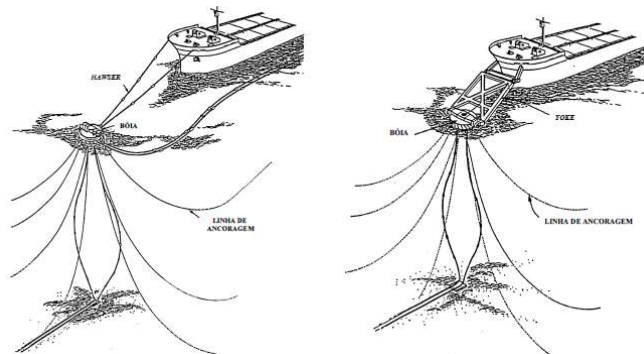


Figura 12: Ancoragem tipo CALM fixado com hawser e com yoke [9].

Este sistema é desconectado da UF quando as condições do mar encontram-se em tormenta, visto que, como a resposta aos esforços ambientais da boia é diferente da resposta do navio, inicia-se um movimento relativo horizontal entre eles. Como outra forma de mitigar o problema, desenvolveram-se estruturas rígidas de acoplamento (*yoke*)

entre boia e navio, para que não seja mais necessária a desconexão do sistema em casos extremos, e para tentar eliminar o movimento vertical entre a boia e a Unidade Flutuante.

2.4.2.3 SALM (*Single Anchor Leg Mooring*)

O Sistema SALM consiste num *riser* rígido vertical com uma boia flutuadora na superfície e acoplado à Unidade Flutuante através de uma estrutura rígida metálica que tem uma ampla capacidade de flutuação próximo à superfície. O sistema basicamente emprega um *riser* articulado com uma forquilha de acoplamento rígida, conforme apresentado na Figura 13.

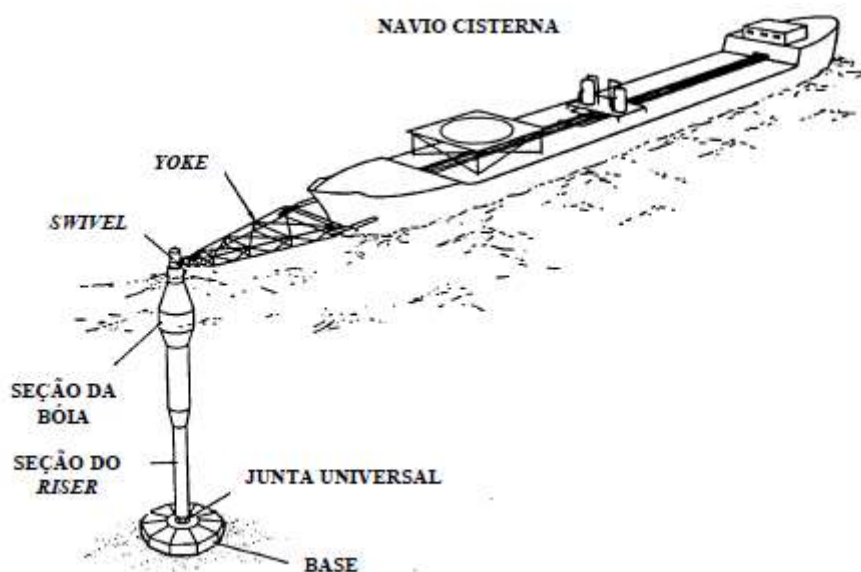


Figura 13: SALM fixado com riser e yoke. [9]

2.4.3 Posicionamento Dinâmico – DP

O Sistema de Posicionamento Dinâmico (*Dynamic Positioning*) pode ser utilizado sozinho ou como auxílio a um sistema já ancorado de alguma forma. É muito utilizado em UF's que permanecem ancoradas temporariamente (atividades de perfuração, completação e intervenção em poços), em situações em que o fundo do mar encontra-se congestionado com equipamentos submarinos e linhas de outras unidades flutuantes, ou em lâminas d'água ultra profundas.

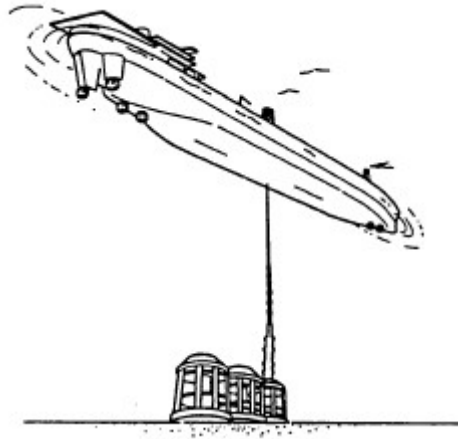


Figura 14: Posicionamento Dinâmico. [9]

As unidades DP podem ser constituídas de navios ou plataformas semissubmersíveis, que mantêm a UF estacionária através de um sistema de controle composto de sonares e GPS, além de um circuito de propulsores (thrusters), que devem ser capazes de gerar uma impulsão no sentido longitudinal e transversal do navio, e de gerar um torque em torno do eixo vertical do seu centro de gravidade. Caso estas unidades estejam operando muito próximas a outras unidades ancoradas, pode ser necessária a utilização de âncoras de segurança, para o caso de sofrerem alguma falha na geração de energia para os seus propulsores.

2.5 Riser

Os *risers* são estruturas de alto custo de investimento que são vitais para o comportamento global das plataformas, visto que cada vez aumenta mais a quantidade de linhas conectadas a estas. O mau funcionamento deles podem provocar desastres ambientais catastróficos com perda de vidas humanas, como é o caso dos *blowouts* [5].

Podendo ser um *riser* condutor que liga um equipamento situado no fundo do mar à unidade de perfuração ou produção (plataforma ou navio). Apresenta-se como um duto esbelto, suspenso do fundo do mar pela unidade flutuante. O sistema do *riser* é, portanto, a interface entre a estrutura estática no fundo do mar e a estrutura flutuante que possui comportamento dinâmico.

Os *risers* também podem desempenhar funções específicas tais como: condução de fluidos entre a cabeça do poço e a unidade flutuante; importação, exportação ou

circulação de fluidos entre a unidade flutuante e um equipamento remoto; guiar os equipamentos de perfuração no poço ou realizar outras funções especializadas.

Como o *riser* deve ser capaz de resistir às forças estáticas e dinâmicas exercidas sobre ele, são aplicados na análise estrutural métodos para garantia da sua integridade na construção e na operação.

De acordo com o material utilizado em sua fabricação, o *riser* pode ser classificado em rígido ou flexível.

2.5.1 *Riser* Rígido

O duto rígido, que geralmente é constituído de aço, mas poderia também ser de titânio ou compósitos, é formado por uma série de juntas de aproximadamente 12 metros de comprimento para perfuração, em geral é instalado na vertical, mas também pode ser instalado em catenária para lâmina d'água profunda.

2.5.2 *Riser* Flexível

O *Riser* flexível é, em geral, constituído de camadas de aço intercaladas com polietileno. As camadas de aço proporcionam flexibilidade ao *riser* e são responsáveis pela resistência à ação dos diversos carregamentos mecânicos, enquanto que as camadas de polietileno proporcionam estanqueidade, proteção contra corrosão e evitam a abrasão das camadas metálicas.

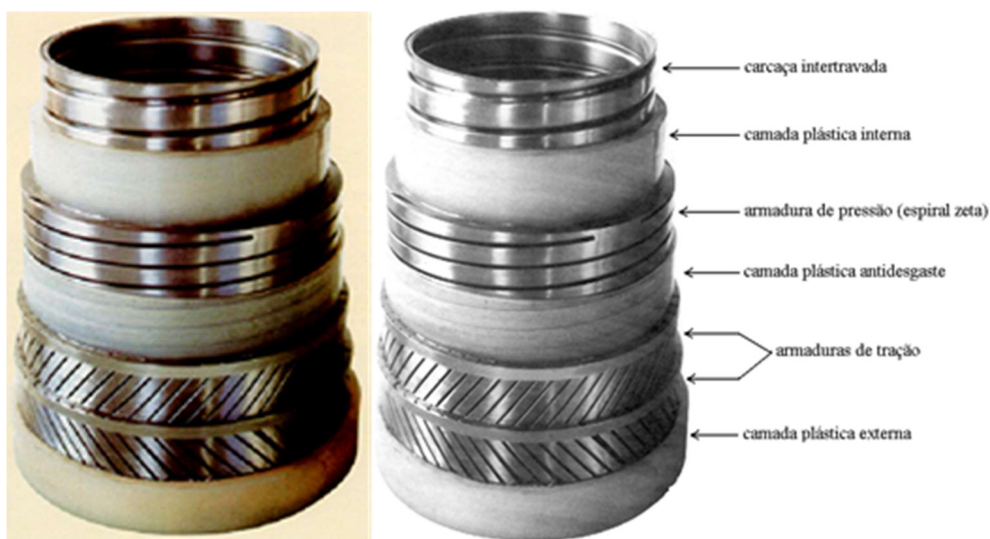


Figura 15: Vista geral das camadas de uma linha flexível. [2]

2.5.3 Diferentes Configurações dos *Risers*

Em projetos de *risers* a configuração típica e mais simples adotada é a catenária livre. Entretanto, ainda são empregadas diferentes configurações de catenária para os *risers* flexíveis. Na figura abaixo são apresentadas algumas das configurações que estes dutos flexíveis podem assumir (podendo-se ainda utilizar de componentes de flutuação para aliviar seu peso submerso) como: lazy-S; lazy-wave, catenária livre, steep-S, steep-wave e a dupla catenária livre.

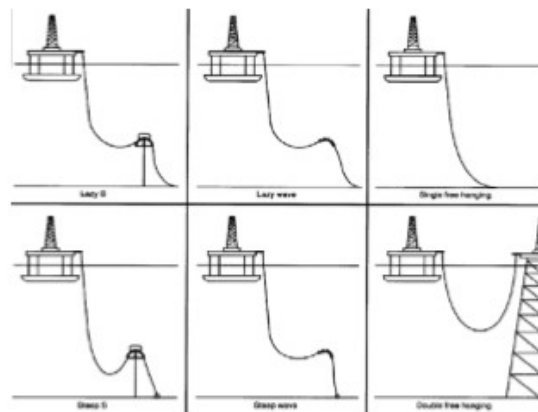


Figura 16: Configurações de *risers* flexível. [10]

Também são utilizados sistemas híbridos que são compostos por uma combinação de *riser* rígido e flexível utilizados em atividades de produção. Esse sistema pretende reunir as vantagens que os dois tipos de estruturas apresentam perante as condições operacionais, como a necessidade de maiores diâmetros para linhas flexíveis para águas profundas, o que implica um elevado custo, podendo inviabilizar a implementação do sistema, e vantagens que beneficiam os *risers* rígidos em catenária (SCR), que são mais afetados pela presença de esforços concentrados na região de topo e em contato com o solo.

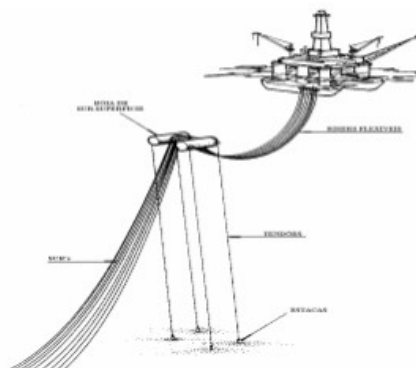


Figura 17: Configuração Híbrida de *Risers*. [10]

3 FORMULAÇÕES DE ANÁLISE

3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma descrição das diferentes formulações utilizadas em diferentes fases do projeto de ancoragem, *riser*, destacando seus usos em metodologias híbridas de projeto integrado *riser*-ancoragem, como o projeto Priar que será mencionado mais adiante. A abordagem mais tradicional é baseada em formulações desacopladas, enquanto a abordagem mais recente é baseada em formulações acopladas. Uma metodologia intermediária ou híbrida que combina os dois modelos também será apresentada.

A seguir, será apresentada de forma resumida as equações de movimento de corpo rígido da plataforma que é utilizada pelas formulações mencionadas.

3.2 Tipos de Modelo Hidrodinâmico de Casco

Uma unidade flutuante é representada em análises de projeto de *risers* e ancoragens através de um corpo rígido com seis graus de liberdade. Como ilustrado na Figura 18, os movimentos da unidade flutuante são estabelecidos da seguinte forma:

- *Surge*: movimento linear do corpo ao longo de seu eixo longitudinal.
- *Sway*: movimento linear do corpo ao longo de seu eixo transversal.
- *Heave*: movimento linear do corpo ao longo de seu eixo vertical.
- *Roll*: movimento de giro do corpo em torno de seu eixo longitudinal.
- *Pitch*: movimento de giro do corpo em torno de seu eixo transversal.
- *Yaw*: movimento de giro do corpo em torno de seu eixo vertical.

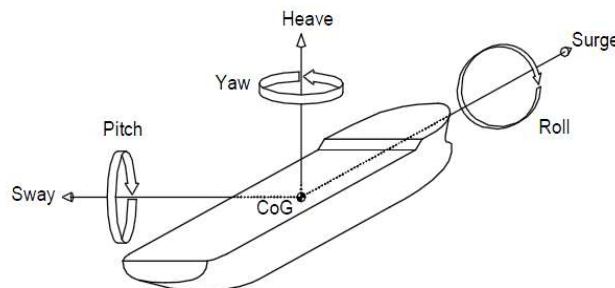


Figura 18: Denominação dos seis graus de liberdade de um corpo flutuante. [9]

Pela segunda lei de Newton sabe-se que o somatório das forças externas é igual ao produto da massa do sistema pela sua aceleração:

Neste item apresenta-se de forma sucinta considerações importantes sobre a formulação e solução das equações de movimento de corpo rígido de unidades flutuantes.

Para o estudo de movimento de corpos flutuantes, é usual adotar dois diferentes sistemas de coordenadas: um sistema de eixos, OXYZ fixado na Terra (sistema inercial) para expressar as translações do sistema; e um sistema de eixos, Gxyz fixado no corpo com origem no centro de gravidade (ou a meia nau, na quilha) para expressar as rotações.

No raciocínio que se segue, vamos supor que o aproamento da plataforma em relação ao sistema global (x, y, z) é zero, ou seja, que o sistema estrutural da plataforma (X, Y, Z) e o sistema global (x, y, z) são originalmente paralelos. A extensão para casos mais gerais com aproamento diferente de zero é trivial.

O movimento do corpo pode ser expresso como o somatório de uma translação da origem do sistema de coordenadas estrutural da plataforma, e uma rotação em torno de um eixo passando pela origem do sistema estrutural. Aplicando a lei de movimento de Newton, a equação diferencial do movimento do navio em relação ao sistema de coordenadas local Gxyz, com origem no seu centro de gravidade, pode ser escrito como [19]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{F}_I + \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_o + \mathbf{F}_{dm} + \mathbf{F}_{dl} + \mathbf{F}_{res} + \mathbf{F}_{pot} + \mathbf{F}_{am} + \mathbf{F}_{AC} + \mathbf{F}_{DC} \quad (4.1)$$

Onde:

\mathbf{M} – Matriz de Massa da unidade flutuante

\mathbf{F}_I – Força inercial adicional, decorrente da análise em um sistema não inercial

\mathbf{F}_v – força de vento

\mathbf{F}_c – força de corrente mais amortecimento viscoso

\mathbf{F}_o – força de onda de primeira ordem

\mathbf{F}_{dm} – força de deriva média de ondas

\mathbf{F}_{dl} – força de deriva lenta de ondas

\mathbf{F}_{res} – força de restauração hidrostática

\mathbf{F}_{pot} – força de amortecimento potencial

\mathbf{F}_{am} – força elástica e inercial das linhas

F_{AC} – força de amortecimento nas linhas

F_{DC} – força de arraste nas linhas

A descrição de cada uma dessas parcelas de força pode ser encontrada na referência [17].

As equações do movimento do navio são normalmente escritas e resolvidas em relação ao sistema de coordenadas local, uma vez que a massa adicional e os coeficientes utilizados para os cálculos das forças hidrostáticas, hidrodinâmicas e aerodinâmicas são tradicionalmente levantados em relação a esse sistema. Tal procedimento tem a vantagem de simplificar as equações para os cálculos destas forças, consequência da simetria do navio. O sistema de coordenadas local tem como eixo “x” a direção longitudinal do navio, positivo à vante, e o eixo “z” na direção vertical, positivo para cima, formando um plano vertical de simetria do navio. O eixo “y” é disposto de forma a se obter um sistema de coordenadas positivo. A origem do sistema é colocada no centro de gravidade do navio, de forma a também se obter uma série de simplificações, no caso, nas expressões de inércia do sistema [9].

A equação de movimento do casco pode ser solucionada por diversos métodos de integração, por exemplo, o método explícito de Runge-Kutta de quarta ordem como apresentado na referência [13].

Em um modelo tradicional para corpos flutuantes de grandes dimensões, como navios, todas as parcelas de força de onda, inclusive de restauração hidrostática, são calculadas a partir de coeficientes determinados através de programas de difração de onda baseados na teoria potencial, como o Wamit [16].

Nesse modelo, todos os coeficientes são calculados no domínio da frequência, assumindo que a onda possui altura infinitesimal e a seção da linha d’água se mantém inalterada com a passagem da mesma. Com isto, os coeficientes gerados não variam com as inclinações que o navio adquire ao longo de uma simulação. Apesar disto, estudos comparativos com ensaios em tanques de prova têm indicado que este modelo numérico ainda é adequado para representar navios. No entanto, para uma maior confiança da representação numérica de qualquer casco, resultados do programa de difração deveriam ser obtidos várias vezes ao longo de uma simulação dinâmica. Este procedimento exige um custo elevado de CPU e memória e por isso, uma estratégia para contornar este problema estaria no uso de processamento paralelo associado a clusters com elevado número de processadores [8].

O Prosim possui, além da formulação de navio descrita no parágrafo anterior, uma formulação híbrida Morison+Froude Krylov+Difração mais adequada para análise de cascos compostos por membros reticulados como no caso de uma plataforma semissubmersível ou uma monobóia. Essa formulação é capaz de tratar adequadamente as não linearidades das forças de onda de primeira ordem e hidrostática, que variam com a inclinação e com a elevação da onda. Para isto, os membros de uma semissubmersível ou o corpo de uma monobóia, por exemplo, são modelados por elementos cilíndricos circulares ou elípticos equivalentes a seção real.

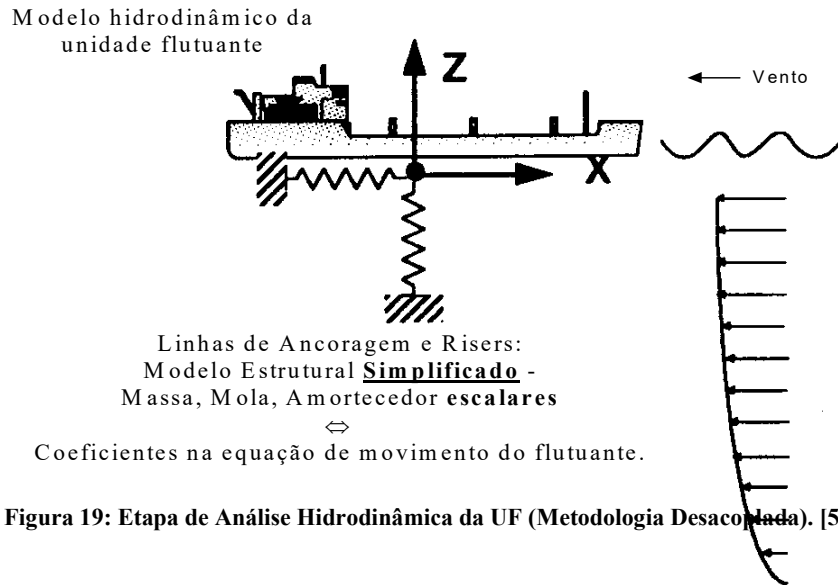
Assim, a parcela de força de onda de primeira ordem seria calculada em cada membro, ao longo do tempo, através do uso da equação de Morison associada à parcela de Froude Krylov e a parcela hidrostática, que é encontrada através do cálculo do volume submerso à elevação de onda de cada membro cilíndrico. As demais parcelas de onda, força de deriva média, lenta e amortecimento potencial, são tratadas da mesma forma que é feita pela formulação tradicional de navio: através dos coeficientes de onda gerados por um programa de difração como o Wamit [16]. Maiores detalhes sobre a formulação de Navio e Híbrida do Prosim podem ser encontrados em [18].

3.3 Formulação Desacoplada

A formulação desacoplada, que está esquematizada na figura 4, é empregada tanto no contexto do casco como nas linhas. No contexto do casco é analisado o movimento do mesmo (com linhas de ancoragem e *risers* representados por modelos simplificados, por exemplo, como coeficientes escalares), obtendo movimentos da UF em termos de deslocamento estático e de componentes de frequência de onda (WF) e de baixa frequência (LF).

No contexto das linhas, análises estruturais das linhas são realizadas usando esses movimentos como entrada, as malhas são refinadas para obter uma resposta estrutural adequada. No entanto, envolve várias simplificações, por exemplo, negligenciando a participação da carga atual da linha no movimento da UF e também desconsiderando a interação não linear entre o movimento da UF e o comportamento hidrodinâmico e estrutural das linhas de ancoragem e *risers*. Conseqüentemente, em muitos casos os resultados podem ser imprecisos. O uso da formulação desacoplada tem o intuito de diminuir os custos computacionais. No entanto, quando é realizado o cruzamento do RAO

com o espectro de onda deve-se escolher o número de componentes, retomando que o objetivo do trabalho é exatamente esse, de verificar também qual o melhor número de componentes a ser utilizado em cada uma das fases na formulação desacoplada.



3.4 Formulação Acoplada

A formulação acoplada é dada pela utilização de modelos em Elementos Finitos capazes de representar a interação não linear do comportamento hidrodinâmico do casco de uma unidade flutuante com o comportamento estrutural e hidrodinâmico das linhas de ancoragem e *risers*. Em uma simulação acoplada, todos os efeitos não lineares dinâmicos do sistema são incluídos implicitamente e automaticamente no esquema de análise. Assim, o equilíbrio é obtido no passo de tempo, garantindo um tratamento consistente entre os movimentos da unidade flutuante e a resposta estrutural das linhas, o que proporciona ao profissional maior confiabilidade nos resultados [20] [21], conforme esquematizado na Figura 20.

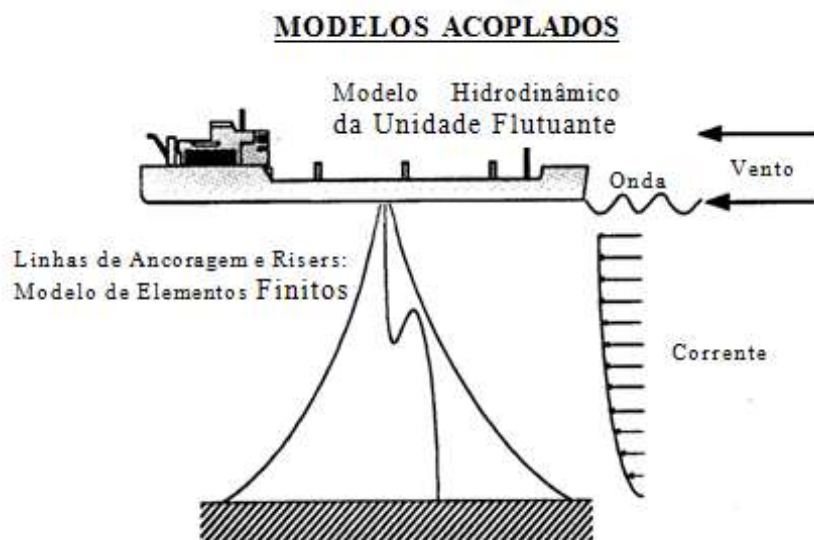


Figura 20: Esquema da Metodologia Acoplada. [5]

No entanto, esta formulação pode levar a custos computacionais excessivos, envolvendo a solução de modelos EF refinados de todas as linhas de amarração e *risers*, com milhares de graus de liberdade, associados a um elevado número de casos de carregamento de projeto.

Em BAHIENSE [11], foram apresentadas duas diferentes estratégias de implementação computacional para as formulações acopladas, que se diferenciam pelos seus respectivos níveis de acoplamento. Estas técnicas são sintetizadas a seguir:

3.4.1 Formulação Fracamente Acoplada

Na implementação fracamente acoplada, o esquema de integração no tempo das equações de movimento de seis graus de liberdade da unidade flutuante é adaptado para, a cada instante de tempo, efetuar uma série de análises não-lineares com modelos de elementos finitos das linhas. Essa implementação “comunica” o corpo rígido que representa o casco com os modelos de EF que representam as linhas de ancoragem e de produção. Basicamente as resultantes de movimento do casco são transmitidas às linhas e subsequentemente às resultantes de força das linhas transmitidas ao casco.

Nestas análises, a cada instante de tempo do processo de integração das equações de movimento da plataforma, efetua-se uma análise não linear dinâmica de um modelo de EF de cada uma das linhas sob a ação do peso próprio, dos carregamentos de onda e correnteza e das componentes de movimento transmitidas pelo casco. Em consequência, as forças de topo que representam a resposta estrutural de cada uma das linhas são então

consideradas no lado direito das equações de movimento do casco, somando-se ainda aos carregamentos devidos à onda, vento e correnteza.

A eficiência computacional deste procedimento de solução é garantida pelo fato de que são gerados modelos de elementos finitos para cada linha individualmente e, portanto, a matriz de rigidez correspondente a cada modelo tem banda relativamente reduzida. Além disso, esta implementação mostra-se naturalmente adequada para computadores com arquitetura paralela.

3.4.2 Formulação Fortemente Acoplada

Conforme apresentado no item anterior, a implementação fracamente acoplada (pelo lado direito das equações de movimento) é capaz de levar a resultados adequados, com a vantagem de oferecer uma melhor eficiência computacional, já que os modelos de elementos finitos de cada uma das linhas podem ser montados e resolvidos de forma completamente independente.

Porém, conforme já mencionado, existem dúvidas quanto à capacidade desta implementação oferecer bons resultados para qualquer classe de problemas em que, por exemplo, as altas frequências de resposta das linhas influenciam efetivamente no comportamento do casco.

O acoplamento fraco faz com que o casco no processo de integração dinâmica encontre primeiro um deslocamento no passo futuro, para então receber as forças das linhas neste passo; e se estas forças variarem muito, o deslocamento do casco deixa de representar uma configuração de equilíbrio dinâmico natural do sistema. A marcha no tempo pode ficar então comprometida (ruídos numéricos de alta frequência, espúrios).

Para investigar esta questão, conforme já mencionado, foi desenvolvida e realizada uma implementação fortemente acoplada, onde todas as matrizes de massa e rigidez, tanto o casco como as linhas, são armazenadas em uma única matriz global, e o casco passa a ser considerado como um “ponto nodal” da malha de elementos finitos de todas as linhas, sendo, portanto mais cara computacionalmente. Essa implementação requer modificações no esquema de integração no tempo das equações de movimento, e procedimentos especiais para transferência de movimentos e forças entre o centro de gravidade da plataforma e as conexões das linhas com a plataforma.

3.5 Formulações Híbridas

Como mencionado anteriormente, as formulações acopladas têm um grande custo computacional envolvido em cada simulação. Devido à necessidade de redução do custo computacional e de memória, que surgiram novas propostas de soluções híbridas tempo-frequência, o procedimento pode tornar-se relativamente caro em etapas iniciais de projeto, por envolver a solução das equações dinâmicas com milhares de graus de liberdade que correspondem às malhas de EF das linhas.

Como alternativa para contornar o problema do custo computacional, surge uma formulação nomeada de Semi-acoplada, que irá executar simulações dinâmicas simplificadas. A forma básica da formulação Semi-acoplada consiste em utilizar um modelo acoplado incluindo a unidade flutuante, linhas de ancoragem e *risers*. A unidade flutuante é analisada dinamicamente no domínio do tempo, enquanto as linhas, de ancoragem e *risers*, são analisadas de maneira quase estática. Seu objetivo é proporcionar tempos de simulação consideravelmente menores do que o exigido por formulações juntamente com precisão melhor do que o normalmente fornecido pelo clássico esquema desacoplado.

Essa formulação conta com capacidade de capturar de maneira precisa os carregamentos de correnteza e a rigidez não linear das linhas, porém não consegue capturar os efeitos de amortecimento e inércia das linhas, os quais podem ser estimados por separado ou simplesmente desprezados.

Assim sendo, desconsiderando a dinâmica das linhas é possível executar simulações bem rápidas, mas a precisão dos resultados irá depender grandemente do amortecimento das linhas, comumente resultado em estimativas de movimento conservadoras. [1]

Apesar das simplificações envolvidas no procedimento da formulação híbrida, as informações derivadas das simulações podem ser de muita importância em etapas iniciais de projeto de sistemas de ancoragem e *risers*, já que devido a suas características podem ser analisadas muitas combinações ambientais com diferentes números de componentes para essa etapa, com grande rapidez e posteriormente selecionar as que causem as maiores solicitações nas linhas.

Já em etapas avançadas de projeto devem ser utilizados outros tipos de formulações para analisar de maneira mais precisa os casos selecionados, que também

poderão ter um número de componentes diferente do utilizado nas etapas iniciais do projeto, como será apresentado mais adiante nos estudos de caso, que foram realizados utilizando a formulação acoplada para o projeto de ancoragem e a formulação desacoplada para o projeto de *riser*.

4 REPRESENTAÇÃO DE ONDA

4.1 Introdução

Compreende-se que as plataformas de petróleo Offshore, tanto as fixas quanto as flutuantes, estão sujeitas à ação de carregamentos ambientais.

Logo, neste capítulo serão apresentadas importantes considerações a respeito do modelo de representação das ondas, as principais forças geradas, quais os tipos de espectro mais utilizados, o conceito da discretização de espectro e os diferentes tipos de métodos de discretização.

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 adiante.

A onda regular fundamenta os modelos chamados de determinísticos, nos quais 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 21. 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. Ademais, também são comumente utilizadas para estimar a resposta das estruturas offshore aos carregamentos externos, além de serem importantes para o entendimento de ondas irregulares.

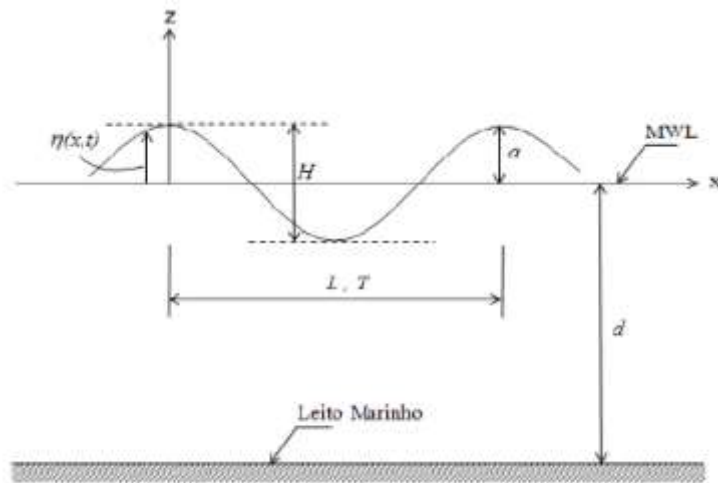


Figura 21: Representação de uma Onda Regular. [2]

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.

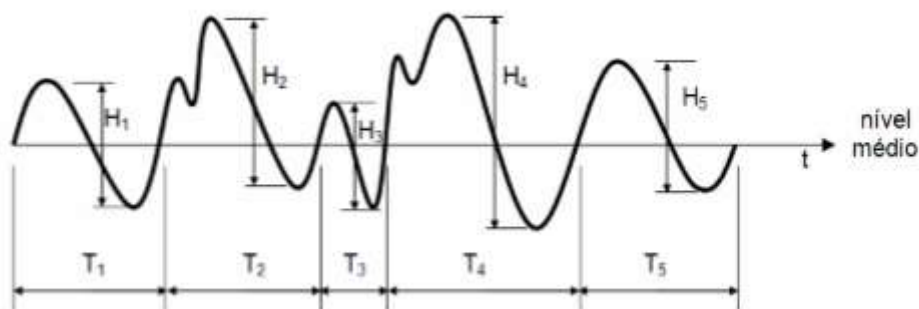


Figura 22: Representação de uma onda Irregular. [11]

Na Figura 22, os valores T_1, T_2, \dots, T_5 são referentes a períodos de cruzamento zero ascendente de ondas individuais, e H_1, H_2, \dots, 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.

Na utilização do método determinístico e devido à natureza aleatória das ondas, é complexo prever seu comportamento e efeito sobre as estruturas offshore. Para tal, foi formulado um modelo matemático de Problema de Valor de Contorno (PVC), que consiste numa equação diferencial com condições de contorno associadas, onde o

potencial de velocidades Φ representa a incógnita, sendo este necessário para a determinação das velocidades, acelerações e pressões do fluido, que pode ser encontrado em CHAKRABARTI [12], e é esquematizado abaixo.

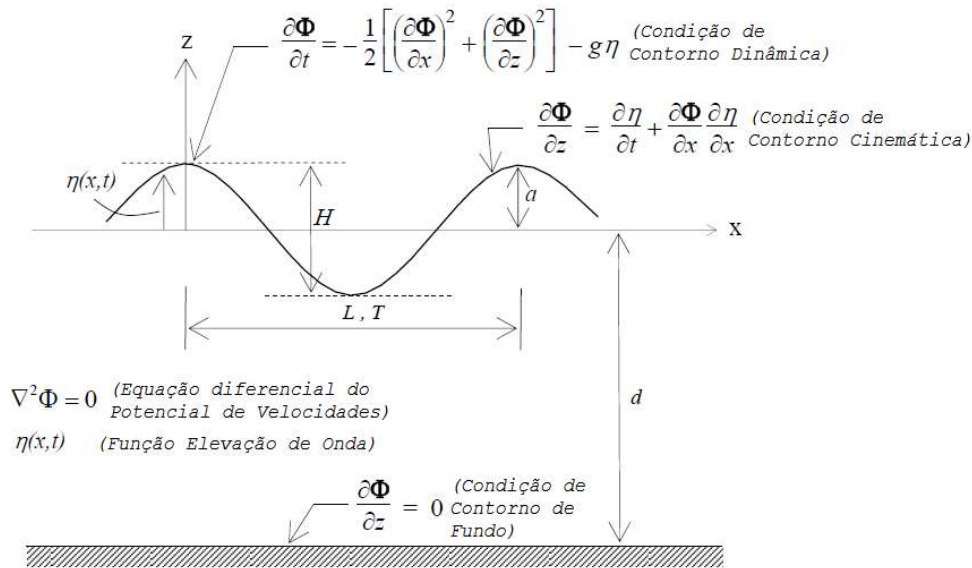


Figura 23: Modelo Matemático da Representação das ondas do mar. [2]

O modelo matemático para estudo do comportamento das elevações da superfície do mar envolve um problema de valor de contorno (PVC), que consiste em uma equação diferencial e as condições de contorno associadas.

Este modelo matemático, usualmente conhecido como a *teoria de onda*, tem por objetivo determinar velocidades e acelerações do fluido, sem considerar a presença do corpo. Esta teoria de onda é uma particularização do modelo mais geral que representa a interação das partículas do fluido com corpos flutuantes ou imersos de grandes dimensões, usualmente conhecido como a “teoria da difração-irradiação”. Este último modelo, que é tridimensional e considera a presença do corpo, tem por objetivo determinar as forças no corpo que resultam da movimentação do fluido induzida pelas ondas.

As Teorias de Onda mais utilizadas em projetos de plataformas *offshore* são:

- *Teoria Linear de Airy*: teoria de primeira ordem, válida para ondas de pequena amplitude, quando comparadas com o seu comprimento (águas profundas);
- *Teoria de Stokes*: teorias não-lineares de segunda, terceira ou quinta ordem.

As teorias de onda citadas podem ser encontradas com mais detalhes em Chakrabarti [12].

Na norma API RP 2A [1] é onde se estabelece qual Teoria de Onda é mais adequada para a utilização em determinado projeto, baseando-se nos seus respectivos parâmetros de onda e profundidade de lâmina d'água.

Importante ressaltar que as Teorias de Onda apresentam uma hipótese simplificadora importante, pois elas desconsideram o efeito da presença de corpos que obstruem a passagem da onda. Desse modo, estas teorias são adequadas para corpos de pequenas dimensões onde esta obstrução possa ser ignorada, como é o caso de membros reticulados de jaquetas e semissubmersíveis. Entretanto, em algumas estruturas, como exemplo o casco de uma FPSO, este efeito não pode ser mais desconsiderado, sendo necessária a utilização de um modelo tridimensional mais complexo, baseado no *Modelo de Difração baseado na Teoria Potencial* [12].

Como mencionado anteriormente, o emprego de um estado de mar irregular como método para representação do comportamento das ondas baseia-se em medições e observações estatísticas realizadas em uma determinada região. Através dessas medições no campo, desenvolve-se um modelo espectral característico desta locação, que apresenta a distribuição de energia de onda discretizada numa faixa de frequências.

O ajuste do modelo espectral é realizado por parâmetros estatísticos conhecidos como Período de Pico, Período Médio ou Período de Cruzamento Zero das Ondas (T_p), Altura Significativa (H_s) e Fatores de Forma Espectral, sendo que cada conjunto destes representa um único estado de mar.

A altura significativa da onda (H_s) é definida como o valor médio de um terço das ondas individuais mais altas, identificadas no registro de elevação da superfície do mar η_t qualquer. Pode ser determinada através da contagem de ciclos, de acordo com o sinal da onda. A partir dos registros de elevação do mar, as maiores ondas são contadas e esse registro é agrupado em ordem decrescente. Dividindo a amostragem em três partes iguais, tira-se a média da terça parte que contenha as ondas com alturas máximas. Sendo definida como altura significativa, e sua representação matemática apresentada a seguir:

$$H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (3.1)$$

Onde N é o número de alturas de onda individuais H_i no sinal aleatório, e cada altura H_i está agrupada em ordem decrescente.

Porém em uma análise espectral, a altura significativa de onda se relaciona com a energia total contida no espectro de onda. Sendo m_0 é a área total de total abaixo do espectro de energia tendo assim:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (3.2)$$

O período de onda médio pode ser obtido a partir do intervalo de tempo total T_S do registro, através de 2 métodos distintos, em uma análise no domínio do tempo e T_p é o período associado a frequência modal do espectro de onda. Sendo N_Z o número de cruzamentos zero no registro, o período de cruzamento zero, T_Z , pode ser obtido da seguinte forma:

$$T_Z = \frac{T_S}{N_Z} \quad (3.3)$$

Para uma análise no domínio da frequência, o período médio é calculado a partir dos momentos espectrais, m_n . O período de cruzamento zero T_Z , é calculado conforme apresentado a seguir:

$$T_Z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3.4)$$

4.2 Representação espectral

O estado de “mar irregular” em geral é representado pela superposição linear de várias ondas regulares, com diferentes valores de período, amplitude e fase. Essas ondas são representadas numericamente, envolvendo procedimentos de discretização de espectros, tais como discretização por período constante, frequência constante ou amplitude constante, que dependem fortemente de um número arbitrado de componentes (seção 4.6). O modelo espectral visa obter a distribuição de energia para cada uma das frequências (componentes do mar) assumindo que a área sob a curva é equivalente à energia total do mar. Para uma dada locação, medições e estudos estatísticos ajustam um modelo de espectro adequado para a representação da distribuição de densidade de energia apropriada das ondas do mar.

A seguir apresenta-se a formulação básica que define a expressão da energia espectral em função de uma faixa contínua de frequências de onda. O espectro fornece a energia contida em um determinado estado de mar. Cada componente harmônica que compõe o estado de mar tem a sua energia dada por:

$$E = \frac{\rho g}{8} H^2 \quad (3.5)$$

Sendo,

E : energia por unidade de área da onda harmônica.

ρ : densidade da água do mar (1.025 ton/m³).

H : altura da onda.

g : aceleração da gravidade (9.806 m/s²).

Para n componentes harmônicas, a energia por unidade de área do estado de mar é dada por:

$$E = \frac{\rho g}{8} \sum_{i=1}^n H_i^2 \quad (3.6)$$

A escolha do espectro de mar e de seus parâmetros característicos é função do fenômeno a ser estudado e dos levantamentos em medições realizados na posição geográfica a que se queira referir. Normalmente, têm sido empregados valores entre 100 e 200 componentes de onda para a discretização do espectro. No entanto, recentemente têm sido levantadas questões a respeito do número adequado de componentes de onda. Isto motivou os estudos sobre a influência deste parâmetro.

Na utilização do método determinístico, o comportamento da onda pode ser descrito por um modelo matemático de Problema de Valor de Contorno (PVC), que consiste numa equação diferencial com condições de contorno associadas, onde o potencial de velocidades Φ representa a incógnita, sendo este necessário para a determinação das velocidades, acelerações e pressões do fluido.

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 [13]. 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 têm o uso mais comum são o modelo de *Pierson-Moskovitz* (1964), baseado na altura significativa de onda ou velocidade de vento [14], o *Bretschneider* (1969) e o *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. [13]

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 [13].

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 [13].

Segundo Chakrabarti [12], 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).

A seguir será detalhado o espectro de *Jonswap*, pois foi o espectro utilizado nesse trabalho.

4.3 Espectro de *Jonswap*

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 [13].

$$S_{Hs,Tz}(\omega) = \alpha \frac{g^2}{2\pi^5 \omega^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right] \quad (3.7)$$

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”) [14].

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 :

$$\gamma = \exp \left[1,0394 - 0,01966 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right] \quad (3.8)$$

$$\alpha = 5,0609 \frac{H_s^2}{T_p^4} [1 - 0,287 \ln(\gamma)] \quad (3.9)$$

4.4 Discretização do Espectro de Onda

Para compreender melhor como funciona a discretização de espectro é preciso aprender o conceito de elevação da onda no tempo. Para a determinação elevação da onda no tempo, admite-se que um estado de mar é matematicamente representado através do seu espectro de energia conforme discutido no item 4.2.

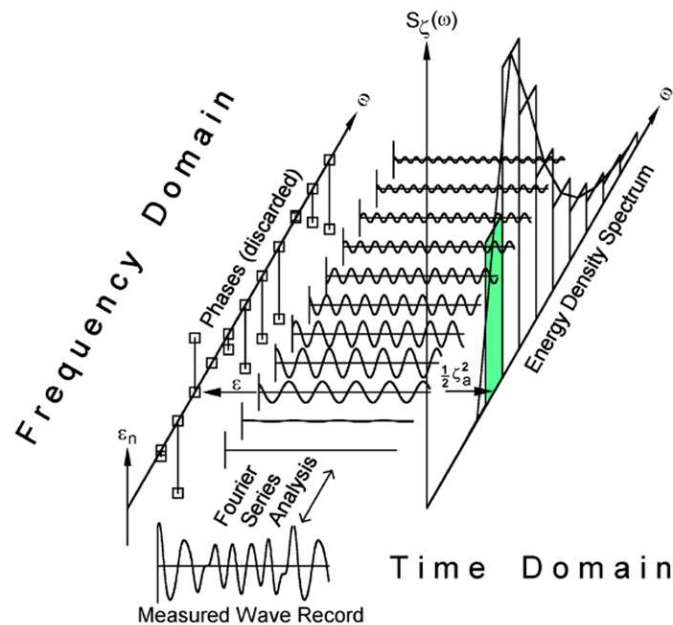


Figura 24: Composição do espectro de mar através de suas componentes harmônicas. [15]

Na Figura 24 se tem uma representação gráfica do significado de um espectro de onda, na região destacada em verde que corresponde à energia por unidade de área de uma das componentes harmônicas que constituem o estado de mar.

O modelo espectral específico pode ser ajustado para cada localização. Trata-se de um modelo estatístico que normalmente é dependente de parâmetros tais como: altura significativa (H_s), período entre picos (T_p), período entre zeros ascendentes (T_z), além de fatores adicionais de forma. Cada conjunto de parâmetros iguais a estes caracterizam um único estado de mar. Para uma estatística de curto prazo assume-se que tais valores são constantes.

Como pode ser visto na Figura 24, o sinal de elevação da superfície livre pode ser decomposto em seus componentes harmônicos de frequência angular ω_i

$$\zeta(t) = \sum_{a=1}^{\infty} \zeta_a \cos[\omega_a t + \theta_a(\omega_a)] \quad (3.10)$$

Onde,

ζ_a : amplitude da a-ésima componente senoidal do espectro de mar.

$$\zeta_a = \sqrt{2S_{\zeta}(\omega_a)\Delta\omega} \quad (3.11)$$

Onde,

$\Delta\omega$: intervalo de frequência angular;

ω_a : frequência angular da a-ésima componente senoidal do espectro de mar.

$$\omega_a = a\Delta\omega;$$

S_{ζ} : espectro de energia da onda;

θ_a : ângulos de fase aleatórios escolhidos no intervalo $[0, 2\pi]$ para a componente harmônica de frequência angular ω_a ;

A discretização do espectro de mar, em termos de um somatório de um número arbitrado de componentes de onda regular, é uma das fases mais importantes da análise aleatória. Em termos gerais, o procedimento consiste em dividir o espectro em n faixas com intervalo de frequência $\Delta\omega_n$. Cada uma destas faixas corresponde a um componente de onda regular, para a qual devem ser determinados os [13]:

- Períodos (ou frequências);
- Amplitudes (dadas por $2 S_i \Delta\omega_i$, onde S_i é a área da i-ésima faixa);
- Fases.

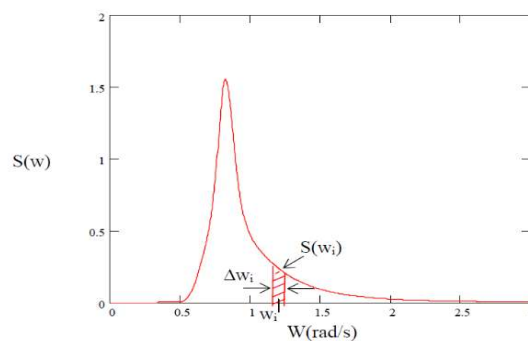


Figura 25: Discretização do espectro.

4.5 Forças Geradas Pelas Ondas

Esse item irá tratar dos procedimentos para o cálculo das forças no casco e nas linhas de ancoragem e *risers* exercidas pelo fluido. Esta é uma das principais tarefas no projeto de sistemas *offshore* trata-se de uma tarefa complexa, pois envolve diversas incertezas, que se somam às envolvidas na formulação do modelo de ondas, e na natureza randômica de um estado de mar real, como descrito anteriormente [5]

Para que seja possível calcular as forças geradas pelas ondas que atuam no casco da plataforma e nas linhas de ancoragem e *risers*, foram desenvolvidas formulações que são verificadas e calibradas por modelos experimentais e também por meio de monitoração de plataformas em operação, que se mostram adequadas para representar com precisão as forças devidas à movimentação do fluido sobre sistemas *offshore*. Segundo Chakrabarti [12], estas formulações podem ser agrupadas em três classes principais, de acordo com sua adequação aos diferentes tipos de sistemas *offshore*:

- Formulação de *Morison*;
- Formulação de *Froude-Krylov*;
- Modelo de Difração / Radiação.

A seguir apresenta-se uma descrição resumida das principais características de cada uma destas formulações.

4.5.1 Formulação de *Morison*

A formulação de *Morison* [2] é bastante difundida em aplicações práticas para o cálculo das forças de fluidos em corpos esbeltos, com dimensão transversal característica D pequena em comparação com o comprimento de onda λ . Um critério usualmente empregado para definir um “corpo esbelto” consiste em verificar se a seguinte relação é atendida:

$$\frac{D}{\lambda} < 5 \quad (3.12)$$

Nestes casos, a formulação de *Morison* assume que as forças podem ser computadas através de uma aproximação na qual os parâmetros importantes do fluxo na

superfície do corpo, tais como pressão, velocidade e aceleração, podem ser aproximados pelo valor correspondente calculado no eixo da seção transversal do corpo esbelto.

A formulação de *Morison* baseia-se na hipótese que a força gerada possui uma parcela de arrasto e uma parcela de inércia, que são representadas empiricamente pelos coeficientes de arrasto C_d e de inércia C_m . A formulação é representada pela equação abaixo.

$$F_{Morison} = \frac{1}{2} \rho_w D C_d |\dot{u} - \dot{x}|(\dot{u} - \dot{x}) + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} (C_m \ddot{u} - C_a \ddot{x}) \quad (3.13)$$

Nesta expressão, ρ_w é a massa específica do fluido; D é uma dimensão transversal característica do corpo (usualmente o diâmetro de um membro cilíndrico); e \dot{u} , \dot{x} , \ddot{u} e \ddot{x} são respectivamente as velocidades e acelerações do fluido e do corpo. O primeiro termo do lado direito desta equação (proporcional às velocidades) corresponde, portanto, à parcela de arraste; o segundo e terceiro termos (proporcionais às acelerações) correspondem à parcela de inércia. Geralmente considera-se que a formulação de *Morison* é mais aplicável quando a força de arraste é significativa, e os efeitos viscosos preponderam sobre os inerciais. Este é usualmente o caso em corpos esbeltos.

A formulação de *Morison* é considerada semi-empírica, já que as parcelas de arraste e inércia são afetadas por coeficientes adimensionais C_d , C_m e C_a , que devem ser calibrados a partir da observação de resultados experimentais. Por exemplo, na análise de linhas de ancoragem e *risers* usualmente empregam-se valores de C_d variando entre 0,7 e 1,2, e valores de C_m em torno de 2,0. O terceiro termo, afetado pelo coeficiente C_a (usualmente definido como $C_m - 1$) é proporcional às acelerações do corpo e está associado a efeitos de “massa adicional”.

A equação de *Morison* tem apresentado bons resultados em aplicações práticas tais como membros de plataformas fixas reticuladas (as jaquetas), e linhas de ancoragem e *risers* modelados por elementos finitos.

De acordo com Chakrabarti [12], a equação de *Morison* é mais aplicável quando a parcela de arrasto é mais significativa, ou seja, quando os efeitos viscosos se sobressaem em relação aos efeitos inerciais. Geralmente isto ocorre em membros esbeltos que possuem um considerável espaçamento entre eles, como é o caso de plataformas fixas, linhas de ancoragem e *risers*.

4.5.2 Formulação de *Froude-Krylov*

Na formulação de *Froude-Krylov*, a força atuante no corpo é proveniente da pressão gerada pela passagem da onda incidente sobre a superfície do corpo, também considerando que a presença do corpo não afeta o fluxo. A partir de uma dada expressão para o campo de pressões no fluido gerado pela onda, podem ser obtidas as componentes de força resultante atuando em um corpo, em cada uma das direções de um sistema de eixos ortogonais. Para isto basta efetuar a integração da correspondente componente da pressão p , sobre a parte submersa do corpo, como indicado a seguir:

$$F_x = C_H \int_S \mathbf{p}n_x ds \quad (3.14)$$

$$F_y = C_V \int_S \mathbf{p}n_y ds \quad (3.15)$$

Estas expressões fornecem respectivamente as componentes horizontal e vertical da força resultante no corpo. n_x e n_y são as componentes horizontal e vertical do vetor normal à superfície do corpo. C_H e C_V são coeficientes de força horizontal e vertical, também determinados empiricamente, como será comentado a seguir (mas não devem ser confundidos com os coeficientes de inércia e de arraste da fórmula de *Morison*).

No cálculo da força de *Froude-Krylov* para um membro cilíndrico da plataforma, a integral que expressa a força resultante é dada por:

$$(3.16)$$

$$f_{FK} = \int_S \mathbf{p}n ds$$

onde S é a superfície que envolve o volume imerso do corpo; \mathbf{n} é um vetor unitário normal à superfície, e \mathbf{p} é um vetor contendo componentes da pressão do fluido.

Pode-se aplicar o Teorema de Gauss para transformar esta integral sobre a superfície submersa do corpo em uma integral do gradiente de pressão ∇p sobre o volume imerso:

$$f_{FK} = \int_S \mathbf{p}n ds = \int_V \nabla \mathbf{p} dv \quad (3.17)$$

Para membros reticulados de plataformas flutuantes, a integração no volume V pode ser substituída pela multiplicação da área da seção transversal A pela integral ao longo do comprimento do eixo do membro. Além disso, considerando que as dimensões da seção transversal são pequenas comparadas com o comprimento de onda, os valores do gradiente de pressão na seção transversal podem ser tomados como constantes e iguais

aos valores calculados no eixo. Desta forma, a força de Froude-Krylov pode ser aproximada pela seguinte integral:

$$f_{FK} = \int_0^L A \left(\frac{dp}{dx}, \frac{dp}{dy}, \frac{dp}{dz} \right) \overline{dx} \quad (3.18)$$

Chakrabarti [12] demonstra que, em muitos casos, as expressões resultantes são semelhantes às obtidas pela parcela de inércia da fórmula de *Morison* (embora, como mencionado anteriormente, o coeficiente que deve ser determinado empiricamente não é o mesmo).

De acordo com Chakrabarti [12], a formulação de *Froude-Krylov* é mais aplicável quando a força de arraste é pequena, e os efeitos de inércia predominam sobre os viscosos, mas o corpo é ainda relativamente esbelto e, portanto, pode-se assumir que a sua presença não afeta significativamente o fluxo das partículas fluidas. Como, ainda segundo Chakrabarti, poucas aplicações práticas atendem a estas hipóteses, em casos onde os efeitos de difração são significativos, mas pequenos, é possível considerá-los na forma de um termo de correção nos coeficientes de força. Em casos mais gerais onde os efeitos de difração são mais importantes, isso não é possível. Além disso, a proximidade do corpo com o fundo ou a superfície livre pode gerar efeitos não facilmente quantificáveis nos coeficientes. Nestes casos, deveria então ser aplicada a formulação completa da teoria da difração.

O modelo hidrodinâmico híbrido do programa Prosim segue a linha sugerida por Hooft, para corpos relativamente esbeltos, tais como membros reticulados de plataformas flutuantes. Neste caso, a parcela de força de *Froude-Krylov* pode ser somada a termos de força de inércia e de arraste semelhantes às parcelas da fórmula de *Morison*, e a termos de segunda ordem vindos da teoria da Difração, como será visto posteriormente.

4.5.3 Modelo de Difração / Radiação

Por fim, quando as dimensões do sistema *offshore* não são pequenas em relação ao comprimento de onda, as hipóteses consideradas nas seções anteriores não são válidas, e espera-se que a presença do corpo altere de forma significativa o campo de ondas na sua vizinhança, gerando efeitos de difração, interferência e radiação de ondas pelo corpo. Portanto, nestes casos de corpos de forma completamente geral, um método rigoroso para o cálculo das forças induzidas pela movimentação das partículas do fluido devido às ondas deve considerar um modelo de Difração/Radiação.

O modelo matemático tridimensional de Difração/Radiação é uma generalização do modelo bidimensional que representa a “teoria de onda”, que pode ser encontrada com mais detalhes em Chakrabarti. Enquanto o modelo da “teoria de onda” tinha por objetivo apenas determinar velocidades e acelerações do fluido, sem considerar a presença do corpo, o modelo de Difração/Radiação considera a presença do corpo e tem por objetivo determinar as cargas que resultam da movimentação do fluido induzida pelas ondas.

Nesse modelo pode estar associado à Teoria Potencial, compondo um modelo matemático em termos de um PVC composto pela equação de Laplace tridimensional com as condições de contorno associadas, mas agora incluindo a consideração do corpo submetido à ação do fluido.

Para estruturas de grandes dimensões parcialmente ou totalmente submersas, como exemplo os navios FPSO’s, as formulações apresentadas anteriormente já não são eficazes, visto que, nestes casos, a presença do corpo altera de forma significativa a passagem da onda progressiva, ocasionando efeitos como a difração e a radiação. Alternativamente, desenvolve-se um modelo matemático tridimensional baseado na Teoria Potencial, que permite a consideração destes efeitos ao longo da movimentação do fluido.

Vale observar que o modelo de Difração/Radiação associado à Teoria Potencial, baseada na equação de Laplace, pressupõe a desconsideração da viscosidade do fluido. Um modelo mais rigoroso que levasse em conta este efeito deveria ser baseado nas equações de *Navier-Stokes*, compondo portanto um modelo matemático ainda mais complexo.

O cálculo das forças de onda por este método é mais complexo e, atualmente, é obtido pela utilização de programas numéricos baseados na Teoria da Difração, como é o caso do WAMIT [16].

4.5.3.1 Solução de Primeira Ordem e Segunda Ordem

Para obter a solução do PVC do modelo de Difração/Radiação associado à Teoria Potencial, pode-se estabelecer um procedimento semelhante ao descrito na seção 4.5.3, a partir da expansão do potencial de velocidade em uma série de potências em termos de um parâmetro de perturbação adimensional ε :

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \Phi_n \quad (3.19)$$

Onde o parâmetro de perturbação ou declividade da onda ε é escrito em função da altura da onda H e do número de onda k :

$$\varepsilon = \frac{KH}{2} \quad (3.20)$$

Na descrição da Teoria Linear de Airy, observa-se que foi tomado apenas o termo linear (de primeira ordem) ϕ_1 da série, que foi então substituída nas equações diferenciais e nas condições de contorno que compunham o PVC da Teoria de Onda.

De modo semelhante, na solução do PVC que descreve o modelo de Difração/Radiação, também podem ser consideradas diversas alternativas, de acordo com a quantidade de termos que se tomar na série: assim, podem ser obtidas expressões para o PVC de primeira ordem (que contém apenas funções lineares da declividade da onda ε ou da altura H), de segunda ordem (que incluem também funções quadráticas de H), e assim por diante.

Com isso, podem ser obtidas separadamente soluções para o PVC (em termos do potencial ϕ_i , velocidades, acelerações e pressões sobre a superfície do corpo) para cada uma das ordens de aproximação que forem consideradas. Em expressões de primeira ordem, a integração das pressões é efetuada até a superfície livre de ordem zero (isto é, o nível de águas tranquilas); os resultados (velocidades, acelerações, pressões) são funções lineares da altura (ou amplitude) da onda. Em soluções de segunda ordem, os resultados são funções lineares e quadráticas da altura de onda.

Para ilustrar, apresenta-se a seguir as expressões de primeira e segunda ordem para a parcela dinâmica do campo de pressões no fluido. Recorda-se que a expressão para a pressão dinâmica em termos do potencial de velocidades é dada pela equação de Bernoulli:

$$P_d = \rho \frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{2} \rho (\nabla \phi)^2 \quad (3.21)$$

Considera-se que a pressão p também pode ser expressa na forma de uma expansão em série de potência com respeito ao parâmetro de perturbação ε :

$$p = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n p_n \quad (3.22)$$

Desta forma, as parcelas de primeira e segunda ordem da pressão dinâmica podem ser obtidas a partir dos termos da expansão do potencial:

$$p_1 = \rho \frac{d\phi_1}{dt} \quad (3.23)$$

$$p_2 = \rho \frac{d\phi_2}{dt} + \frac{1}{2} \rho (\nabla \phi_1)^2 \quad (3.24)$$

A partir destas expressões para as pressões na superfície do corpo, as componentes de força em cada direção ortogonal podem ser obtidas efetuando-se a integração da respectiva componente de pressão sobre a superfície submersa S:

$$F_{nj} = \varepsilon^n \iint_S p_n n_j ds \quad (3.25)$$

Onde n_j é a direção normal à direção j. O resultado F_{nj} é a força de ordem i na direção j. Observa-se que a integração da força de primeira ordem é calculada até a superfície livre de ordem zero (isto é, o nível de águas tranquilas), enquanto a força de segunda ordem é calculada para a parte submersa da estrutura até a superfície livre de primeira ordem.

4.5.3.2 Resposta de Movimento de Primeira Ordem (RAO)

Conseqüentemente da aplicação de uma teoria potencial de primeira ordem ou linearizada, obtém-se forças “de primeira ordem” atuando sobre o corpo que oscilam com a mesma frequência da onda.

Os programas que resolvem o modelo de Difração/Radiação tais como o *WAMIT*, calculam os “movimentos de primeira ordem” gerados por estas forças em termos de tabelas conhecidas como *Response Amplitude Operator* (RAO's), quando se está com o movimento desacoplado. Estas tabelas fornecem, para várias direções de incidência da onda sobre o casco e para várias frequências de onda, a resposta da embarcação sob a ação de uma onda de amplitude unitária, em termos da amplitude de cada grau de liberdade dos movimentos.

De acordo com a segunda lei de Newton sabe-se que o somatório das forças externas é igual ao produto da massa do sistema pela sua aceleração:

$$\sum F_{ext} = M\ddot{X} \quad (3.26)$$

Como forças externas tem-se a restauração hidrostática, a força de excitação de onda e a reação do meio fluído aos movimentos do corpo (forças de irradiação). Substituindo-se estas componentes na equação (isolando-se a força de excitação no segundo membro e agrupando-se os termos proporcionais à aceleração, velocidade e deslocamento no primeiro membro, tem-se a seguinte equação de movimentos de um corpo flutuante, em seus seis graus de liberdade, no domínio da frequência:

$$(M_{j,k} + A_{j,k}(\omega))\ddot{X} + (C_{j,k}(\omega) + Cex_{j,k})\dot{X} + (K_{j,k} + Kex_{j,k})X = F_j \quad (3.27)$$

Onde,

- j, k: graus de liberdade variando de 1 à 6.
- A: matriz de massa-adicional oriunda do potencial de irradiação.
- C: matriz de amortecimento composta pela soma das matrizes de amortecimento potencial obtida a partir do potencial de irradiação.
- C_{ex}: matriz de amortecimento externo, independente da frequência. Útil para incluir termos viscosos que não são cobertos pela teoria potencial.
- K: matriz de restauração hidrostática. Dependente exclusivamente da geometria do casco.
- M: matriz de massa.
- K_{ex}: matriz de restauração externa. Pode ser utilizada para incluir efeitos de restauração que não se devem a geometria do casco em si (linhas de ancoragem, por exemplo).
- F: força de excitação. Termo composto pela soma das forças devido aos potenciais de onda incidente e de difração.

Supondo-se que as forças de excitação são harmônicas no tempo:

$$F = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{i\omega t + \delta} \quad (3.28)$$

Os deslocamentos também o serão, portanto:

$$X = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{i\omega t + \varphi} \quad (3.29)$$

As velocidades e acelerações são obtidas através das derivadas do deslocamento:

$$\dot{X} = i\omega x_n e^{i\omega t + \varphi} \quad (3.30)$$

$$\ddot{X} = i\omega^2 x_n e^{i\omega t + \varphi} \quad (3.31)$$

Onde: x_n e f_n representam o espectro da frequência da função deslocamento e carregamento, respectivamente; i é um termo imaginário ($i = \sqrt{-1}$); φ é o ângulo de fase; ω é frequência angular em radianos por segundo, em que o carregamento $F(t)$ e a função resposta $u(t)$, se repete indefinidamente, de $-\infty + \infty$; e N o número de termos da Transformada Discreta.

Substituindo-se as componentes harmônicas acima na equação do movimento (3.26) tem-se:

$$K \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{i\omega t + \varphi} + C \cdot \sum_{n=0}^{N-1} i \cdot \omega \cdot x_n \cdot e^{i\omega t + \varphi} - M \cdot \sum_{n=0}^{N-1} i\omega^2 \cdot x_n \cdot e^{i\omega t + \varphi} = \sum_{n=0}^{N-1} f_n \cdot e^{i\omega t + \delta} \quad (3.32)$$

Ou,

$$F_n e^{i\omega t + \varphi} = \frac{[-\omega^2(M_{j,k} + A_{j,k}(\omega)) - (i\omega(C_{j,k}(\omega) + Cex_{j,k})) + (K_{j,k} + Kex_{j,k})]x e^{i\omega t + \varphi}}{F_n} \quad (3.33)$$

Conforme pode ser verificado na equação (3.33), os coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial variam com a frequência e com o grau de liberdade. Já as forças de excitação e os deslocamentos são dependentes da frequência, da direção da onda incidente, e do grau de liberdade.

Para os deslocamentos do corpo flutuante, a Função de Transferência ou RAO (*Response Amplitude Operator*) é obtida diretamente partir da equação (3.33):

$$x_n = \frac{F_n}{[-\omega^2(M_{j,k} + A_{j,k}(\omega)) - (i\omega(C_{j,k}(\omega) + Cex_{j,k})) + (K_{j,k} + Kex_{j,k})]} \quad (3.34)$$

O deslocamento x dado por (3.34) é um número complexo de onde podem ser obtidos o módulo e a fase a partir da composição das parcelas real e imaginária.

$$\begin{aligned} |x| &= \sqrt{Re^2 + Im^2} \\ \varphi &= \tan^{-1} \left(\frac{Im}{Re} \right) \end{aligned} \quad (3.35)$$

4.5.3.3 Resposta de Movimento de Segunda Ordem

Em soluções de segunda ordem pode ser demonstrado que surgem outras parcelas de carga atuando em diferentes faixas de frequência. Dentre elas incluem-se as forças que geram efeitos de deriva e “*springing*”, como será mencionado a seguir.

A força de deriva consiste em uma parcela *estática* ou de “deriva média”, em ondas regulares, cuja magnitude depende da frequência e é proporcional ao quadrado da amplitude da onda. Expressões analíticas fechadas para esta parcela de carga, em alguns casos particulares tais como uma parede vertical ou um cilindro horizontal. Em casos gerais, a solução deve ser obtida numericamente, obtendo-se coeficientes conhecidos como “funções de transferência quadrática” (QTF ou *quadratic transfer functions*). Para um dado valor w_i de frequência de onda regular, a função define um coeficiente que fornece a força de deriva associada à onda regular com frequência w_i e amplitude unitária. Mais adiante será ilustrado como tais coeficientes, fornecidos por programas que resolvem a Teoria Potencial (como por exemplo o WAMIT), são incorporados no procedimento de solução no domínio do tempo do programa Prosim.

Em se tratando de estados de mar irregulares, com espectro representado por uma superposição de várias componentes de ondas lineares de Airy com amplitudes a_j e

frequências ω_j , além das cargas de deriva média resultante da ação de cada uma das componentes de onda, surgem outras cargas de onda que variam no tempo, oscilando em:

- *Frequências baixas* (correspondentes à diferença das frequências das ondas que representam o espectro). Em plataformas ancoradas, estas cargas podem excitar movimentos usualmente referidos como de “deriva lenta”.
- *Frequências altas* (correspondentes à soma das frequências das ondas). Em plataformas TLP ancoradas por tendões verticais, estas cargas podem excitar movimentos usualmente referidos como de “*springing*” ou “*ringing*”.

O cálculo das forças de segunda ordem associadas a estados de mar irregulares pode ser efetuado avaliando e integrando a expressão da pressão do fluido atuando no casco, mantendo os termos de segunda ordem. Também podem ser expressas como funções do quadrado da amplitude de cada componente de onda. Com isso é possível deduzir expressões para coeficientes de transferência (QTF) semelhantes aos já mencionados acima no caso das cargas de deriva média.

Na implementação do programa Prosim, para incluir as parcelas de força de deriva (dependente da frequência) em uma simulação no domínio do tempo, efetua-se a combinação da função de transferência com as propriedades da onda (frequências, amplitudes) em cada instante de tempo. Recorda-se a expressão da elevação da superfície livre como resultado da soma de componentes de ondas regulares que representam um mar irregular:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (3.36)$$

Onde ε_i é a fase randomicamente distribuída no intervalo $[0, 2\pi]$.

A parcela da força de deriva média ou estática é dada por

$$F_0 = \sum_{i=1}^N D_{ii} a_i^2 \quad (3.37)$$

Onde D_{ii} é a função de transferência da força de deriva da onda regular com frequência ω_i .

Recorda-se a expressão geral da parcela de força de deriva lenta ou de baixa frequência:

$$F_s(t) = \sum_i^N \sum_j^N D_{ij} \frac{a_i a_j}{2} \cos[(\omega_i - \omega_j) t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \quad (3.38)$$

Considerando a aproximação de Newman [18], assume-se que $D_{ij} = D_{kk}$, onde D_{kk} é a função de transferência da força de deriva média da onda regular com frequência igual à média entre ω_i e ω_j . Com isto, obtém-se a seguinte expressão:

$$F_s(t) = \sum_i^N \sum_j^N D_{kk} a_i a_j \cos[(\omega_i - \omega_j) t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \quad (3.39)$$

A parcela \mathbf{f}_D correspondente às forças de deriva média e lenta é então dada pela soma das equações (3.38) e (3.39):

$$\mathbf{f}_D = \mathbf{f}_0 + \mathbf{f}_s \quad (3.40)$$

4.6 Tipos de Método de Discretização

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, com valor da frequência tomada aleatoriamente dentro do intervalo;
- Amplitudes constantes.

Também foram implementados os seguintes procedimentos:

- Intervalo de períodos constantes;
- Intervalo de períodos constantes com amostragem aleatória.

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

As figuras a seguir, que exemplificam as alturas da onda dependente da frequência para diferentes tipos de discretização, foram geradas a partir das simulações do estudo de caso, utilizando o programa Situa- Prosim.

4.6.1 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 [13]. A Figura 26 apresenta as alturas de onda geradas por este tipo de discretização, obtidos a partir do Prosim.

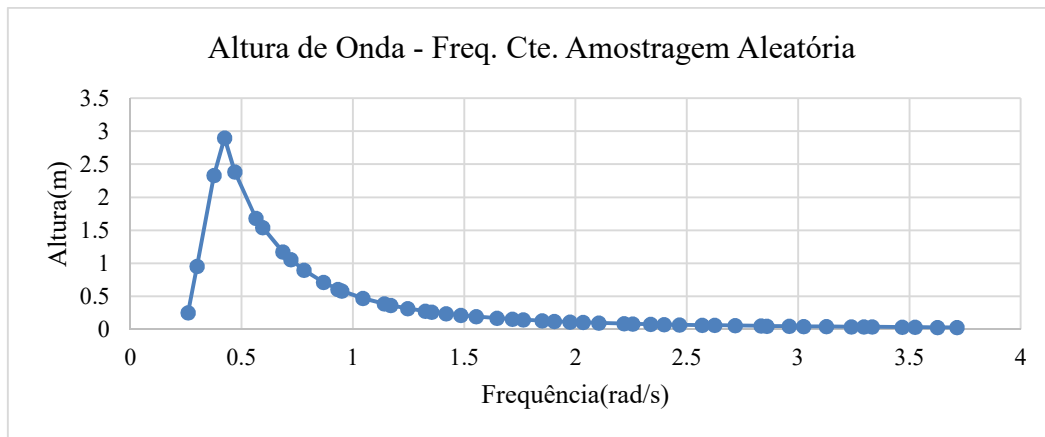


Figura 26: Elevação de Altura de Onda.

4.6.2 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, já que nesse tipo de discretização é mantida a área constante.

Os procedimentos baseados em intervalos de freqüência constantes, por sua vez, não apresentam este requisito. Além disso, quando se usa a freqüência aleatória no lugar da freqüência média dentro de cada intervalo, evita-se a periodicidade das freqüências, reforçando assim a característica aleatória do processo [14]. A Figura 27 apresenta as alturas de onda geradas por este tipo de discretização, obtidos a partir do Prosim.

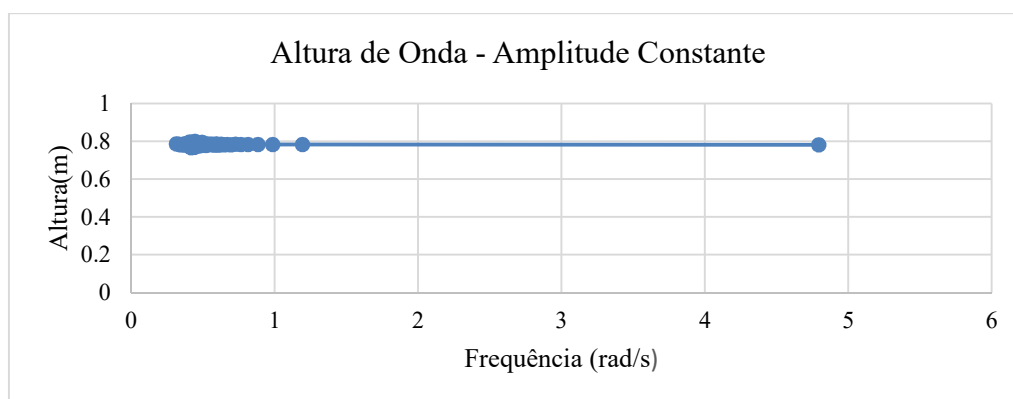


Figura 27: Elevação de Altura de Onda.

4.6.3 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:

$$T_i = T_{Máx} - \Delta T_0, i = 1, N \quad (3.43)$$

$$T_i = \frac{1}{f_i} \quad (3.44)$$

Encontra-se

$$\Delta \omega_0 = \omega_i - \omega_{i-1}, i = 1, N \quad (3.45)$$

A amplitude de cada componente de onda é dada por:

$$a_i = \sqrt{2S_i \Delta \omega} \quad (3.46)$$

Onde S_i é a área da i -ésima faixa em que foi dividido o espectro. A Figura 28 apresenta as alturas de onda geradas por este tipo de discretização, obtidos a partir do Prosim.

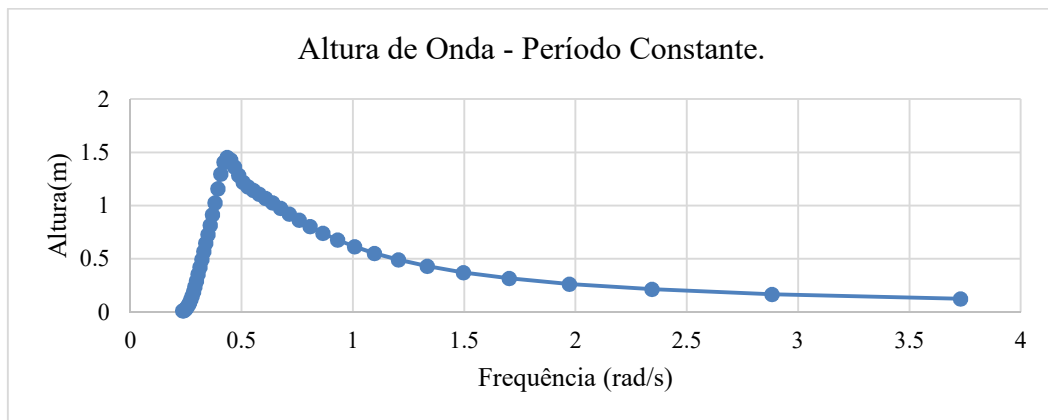


Figura 28: Elevação da Altura de Onda.

4.6.4 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:

$$T_i = T_{max} - \Delta T_0 \cdot Phas(i), i = 1, N \quad (3.47)$$

Onde, $Phas(i)$ é gerado randomicamente. A Figura 29 apresenta as alturas de onda geradas por este tipo de discretização, obtidos a partir do Prosim.

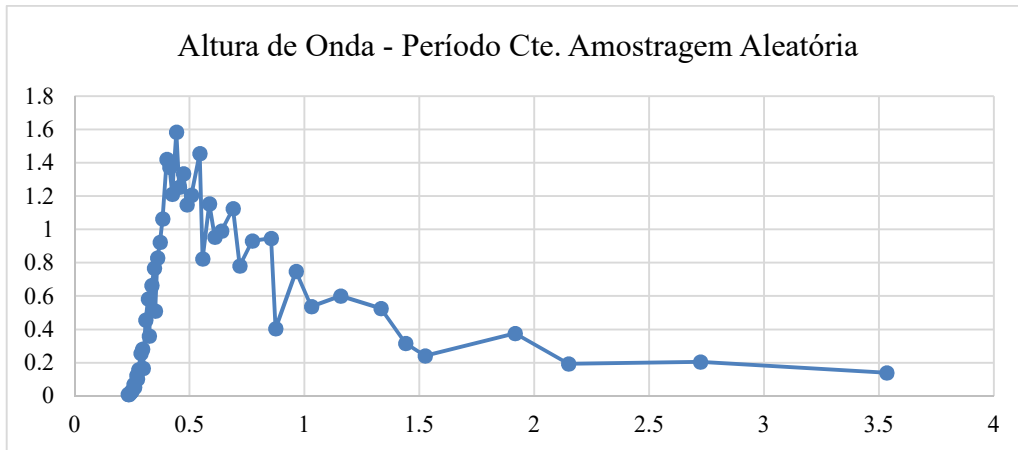


Figura 29: Elevação da Altura de Onda.

5 METODOLOGIAS DE PROJETO

5.1 Introdução

Cabe recordar que este trabalho envolve estudos sobre a influência do procedimento de discretização de espectros de onda nas repostas de projeto de ancoragem e *risers*, buscando levantar o tipo de discretização e o número de componentes mais apropriados para cada tipo projeto (riser e/ou ancoragem), portanto é necessário conhecer as metodologias usualmente empregadas em cada um deles.

O presente capítulo tem por objetivo mostrar uma visão geral das metodologias de análise e projeto de linhas de ancoragem e *risers* utilizadas em plataformas flutuantes de produção.

No item 5.5 deste capítulo, são abordadas as propostas inovadoras envolvidas no projeto de sistemas de ancoragem e *risers* que atualmente estão sendo estudadas e algumas delas já adotadas no desenvolvimento de projetos. Estas propostas estão focadas na integração do projeto do sistema de ancoragem e dos *risers* de plataformas flutuantes de produção.

5.2 Metodologia Desacoplada

Para auxiliar o engenheiro na elaboração de projetos mais eficientes de sistemas de ancoragens e *risers*, programas de simulação numérica têm se constituído em ferramentas indispensáveis.

A análise e projeto de unidades flutuantes ancoradas baseia-se no uso de programas que incorporam formulações desacopladas que tratam os movimentos do casco da unidade flutuante separadamente do comportamento estrutural dinâmico não-linear das linhas de ancoragem e *risers*.

A metodologia desacoplada apresenta grandes vantagens em custo computacional, porém envolve simplificações. Uma das características dos processos desacoplados de análise é não levar com rigor a interação entre os componentes da plataforma.

Por exemplo, dentro das análises do sistema de ancoragem existe pouca ou nula consideração do comportamento estrutural dos *risers* em termos de massa adicionada,

rigidez, amortecimento e cargas hidrodinâmicas, o que poderia representar uma inconsistência grave em projetos de plataformas em águas profundas e com grande quantidade de *risers*.

Esta metodologia foi criada e aprovada quando os sistemas de exploração por unidade flutuante eram locados em cenários correspondentes a lâminas d'águas rasas e intermediárias.

Este procedimento desacoplado consiste em empregar a seguinte sequência de análises:

1. Em uma etapa inicial, efetua-se a análise desacoplada de movimentos do casco. Nesta análise, as linhas são representadas por um modelo simplificado composto por coeficientes escalares de massa, rigidez, amortecimento e carregamento, que são introduzidos na equação de movimento da unidade. Os valores para estes coeficientes devem ser estimados, ou calibrados através de ensaios experimentais (por exemplo, um teste de decaimento que fornece coeficientes de massa adicionada e amortecimento).
2. Em uma etapa posterior, é empregada a análise desacoplada de projeto estrutural de *risers* e/ou linhas de ancoragem isoladamente, em que os movimentos que resultam da análise do casco são transferidos como movimentos prescritos para o topo das linhas que são modeladas geometricamente por malhas de elementos finitos refinadas o bastante para garantir uma avaliação estrutural local confiável.

Esse procedimento, que estava estabelecido, vem sendo aos poucos abandonado, pois se constituía para reduzir os requisitos de tempo de CPU requeridos pelas análises. Ignorando o fato de que o casco, as linhas de ancoragem e os *risers* compõem um sistema integrado, são introduzidas simplificações que fazem com que a interação do comportamento dinâmico não-linear destes componentes não seja considerada de forma rigorosa, o que pode penalizar seriamente a qualidade dos resultados.

Como já mencionado, sabe-se que as simplificações relacionadas ao procedimento de análise desacoplada são aceitáveis até lâminas d'águas intermediárias (e com poucos *risers*) e se tornam mais graves para sistemas com grande número de *risers*, e/ou instalados em lâminas d'água profundas; este último aspecto pode se tornar crucial quando se consideram projetos de unidades flutuantes ancoradas em até 3000m de lâmina d'água. [19]

A partir dos resultados do último passo da análise estática, realiza-se a análise dinâmica no domínio do tempo, onde são acrescentadas as parcelas dinâmicas que

incluem a onda atuando diretamente sobre o *riser* e os movimentos do casco. Os movimentos dinâmicos do casco são encontrados através do cruzamento dos operadores de amplitude de resposta ou RAOs (Response Amplitude Operators) com o espectro do mar considerado.

Em Chakrabarti, pode-se ter uma visão geral da metodologia clássica desacoplada, neste caso desde o ponto de vista dos *risers*. [13]

Cabe ressaltar que dentro da metodologia desacoplada é estabelecido um conjunto de combinações ambientais para analisar o sistema de ancoragem e outro para analisar os *risers*, os quais podem não ser coincidentes. Isto é, a partir de uma matriz principal de condições ambientais com vários períodos de retorno correspondente à zona onde a plataforma será instalada é determinado um conjunto de combinações de ações ambientais (correnteza, onda e vento) para analisar o sistema de ancoragem.

Em compensação, utilizando os resultados de passeios do casco calculados nas análises do sistema de ancoragem e a matriz principal de condições ambientais, é determinado um novo conjunto de combinações de ações ambientais para projetar cada *riser*.

Isso envolve duas situações importantes em projetos. A primeira é que, mesmo que os *risers*, as linhas de ancoragem e o casco formem parte de um sistema acoplado que responde em conjunto às ações ambientais, nos procedimentos desacoplados podem facilmente ser analisadas situações diferentes para cada um desses componentes.

A segunda é a grande quantidade de combinações ambientais por analisar dentro de um projeto de uma plataforma, já que se somam as utilizadas para analisar tanto o sistema de ancoragem quanto cada *riser*.

5.3 Metodologia Acoplada

Sabe-se que metodologias desacopladas introduzem simplificações que desprezam a interação entre o comportamento dinâmico não-linear da embarcação e das linhas de ancoragem e *risers*, desconsiderando efeitos importantes tais como a interação entre o movimento de baixa frequência da unidade flutuante e a carga de correnteza nas linhas e *risers*, conforme visto no item anterior. Recentemente, estão sendo usadas plataformas flutuantes em águas profundas com um número de *risers* cada vez maior, e têm sido propostos procedimentos combinando a utilização simultânea de programas de

análise hidrodinâmica de movimentos do casco, e de análise estrutural de linhas, comunicando-se através de interfaces externas. A identificação dessa situação implicou o desenvolvimento de programas computacionais de simulação numérica baseados em uma formulação acoplada. No projeto desse tipo de sistemas pode deixar de ser aplicável a metodologia desacoplada, pois as simplificações nela utilizadas podem conduzir a resultados inconsistentes.

A formulação acoplada utiliza modelos tridimensionais para representar o casco da plataforma e as linhas de ancoragem e *risers*. Um modelo hidrodinâmico de corpo rígido representa o casco, o qual está acoplado a um modelo de elementos finitos para a representação rigorosa das linhas de ancoragem e os *risers* e a sua interação como o solo.

Como mencionado anteriormente, as ferramentas de análise acoplada no domínio do tempo são capazes de gerar simultaneamente os movimentos do casco e a resposta estrutural das linhas de ancoragem e os *risers*, logo os resultados obtidos por um programa baseado numa formulação acoplada, em termos de movimentos da unidade flutuante, por exemplo, vão ser mais precisos do que aqueles obtidos através de análises desacopladas, já que as formulações acopladas consideram implicitamente e, automaticamente, todos os efeitos não lineares e dinâmicos resultantes da interação entre o casco e as linhas. Além das vantagens de capturar o as não linearidades da interação dos componentes das plataformas, o uso de modelos acoplados leva implicitamente a avaliar cada um desses componentes sob a mesma matriz de carregamento ambiental.

A principal desvantagem de executar análises acopladas deste tipo se deve a que, para fornecer a resposta estrutural detalhada, principalmente dos *risers*, é necessário empregar malhas de elementos finitos muito refinadas.

Em consequência, o tempo de processamento é muito grande, sendo geralmente inviável a sua utilização em projetos ou reduzindo seu uso para analisar exclusivamente alguns poucos casos críticos identificados.

5.4 Metodologia Híbrida

A Metodologia Híbrida foi desenvolvida com o objetivo de reduzir o custo computacional, e de memória, e de obter um equilíbrio entre a precisão dos resultados e a eficiência computacional. O procedimento pode tornar-se relativamente caro em etapas

iniciais de projeto, por envolver a solução das equações dinâmicas com milhares de graus de liberdade que correspondem às malhas de EF das linhas.

Como alternativa para contornar o problema de custo computacional, surge esta metodologia que baseia-se principalmente na combinação da utilização de metodologia acopladas e desacopladas para a determinação dos movimentos do sistema flutuante e realização da análise estrutural das linhas, que irá executar simulações dinâmicas simplificadas. A forma básica da metodologia híbrida consiste em utilizar um modelo acoplado incluindo a unidade flutuante, linhas de ancoragem e *risers*. A unidade flutuante é analisada dinamicamente no domínio do tempo, enquanto que as linhas, de ancoragem e *risers*, são analisadas de maneira quase estática. Seu objetivo é proporcionar tempos de simulação consideravelmente menores do que o exigido por formulações juntamente com precisão melhor do que o normalmente fornecido pelo clássico esquema desacoplado.

Atualmente, a utilização da Metodologia Híbrida no projeto de sistemas de ancoragem e *risers* são consideradas essenciais e está sendo adotada pelas empresas líderes do ramo para os projetos de suas novas plataformas flutuantes, cuja lâmina d'água e quantidade de *risers* conectados são muito maiores.

O objetivo desta metodologia é não somente obter maior precisão nos resultados de movimento da plataforma e esforços nos *risers*, mas também caminhar na direção de uma maior integração entre o projeto do sistema de ancoragem e o projeto dos *risers*.

É sobre o aspecto desta metodologia que se buscou estudar o uso da técnica de redução de base para otimizar ainda mais as simulações acopladas que compõe a primeira etapa da metodologia híbrida de análise. Além disto, ela reduz significativamente o custo computacional exigido nos modelos fortemente acoplados.

5.5 Projeto Integrado de Ancoragem e *Risers* (PrIAR)

No contexto das metodologias de projeto de ancoragem e *risers*, Girón [20] aborda o projeto integrado, que pode ser considerado em fases mais avançadas do projeto, é empregando um programa baseado em uma formulação totalmente acoplada, capaz de fornecer, em uma única análise, tanto os movimentos do casco quanto uma análise estrutural detalhada do sistema de ancoragem e dos *risers*. Para tal, seria necessária a representação de todas as linhas através de uma malha de Elementos Finitos consideravelmente refinados.

Na tese de Girón [20] é apresentada uma metodologia de projeto integrado Ancoragem/Riser ou PrIAR. Essa metodologia visa que o projeto de ambos os sistemas seja realizado de maneira interativa. Os projetos de linhas de ancoragem e *risers* de sistemas flutuantes de produção têm sido tradicionalmente realizados separadamente, considerando pouca interação entre si. Este trabalho apresenta uma metodologia que integra as atividades de projeto de ancoragem e *risers* em uma única espiral, permitindo ganhos de eficiência e redução de custos.

Neste trabalho o autor deixa claro que embora os *risers* e o sistema de ancoragem tenham exigências diferenciadas de projeto, eles são um sistema integrado que corresponde às dinâmicas de cargas ambientais de correnteza, onda e vento. É reconhecido que a opção que nos fornece melhores resultados na análise de ancoragem e *risers* é o uso de modelos numéricos com a formulação acoplada, no entanto, seu elevado custo computacional dificulta a sua aplicação de forma integral em projetos.

Esta metodologia pode ser aplicada em plataformas flutuantes de águas profundas como a FPSO, semissubmersível e Spar. Ela se baseia na utilização de modelos híbridos de análise. Logo, faz uso da formulação desacoplada e acoplada, em diferentes etapas do projeto com intuito de manter equilíbrio, precisão e o custo computacional.

Se espera que os *risers* suportem os passeios da plataforma bem como as solicitações ambientais de corrente e onda. Por outro lado, os sistemas de ancoragem geralmente são projetados para não ultrapassar os offsets limites dos *risers* em qualquer direção bem como os limites de trações das linhas. Os *risers* devem atender os seus critérios de projeto condicionados e restritos pelo sistema de ancoragem. Isto pode não ser o mais adequado, uma vez que é bem conhecido que os *risers* para sistemas em águas profundas são de custo bem maior do que as linhas de ancoragem. Desse modo, os critérios de projeto dos *risers* são avaliados posicionando seu topo em distâncias equivalentes com os passeios limite estabelecidos para avaliar o sistema de ancoragem.

[1]

Abaixo será apresentado o fluxograma da metodologia PrIAR elaborado por Girón [20], onde são separadas as etapas em fases, explicitando como é realizado o estudo dessa metodologia.

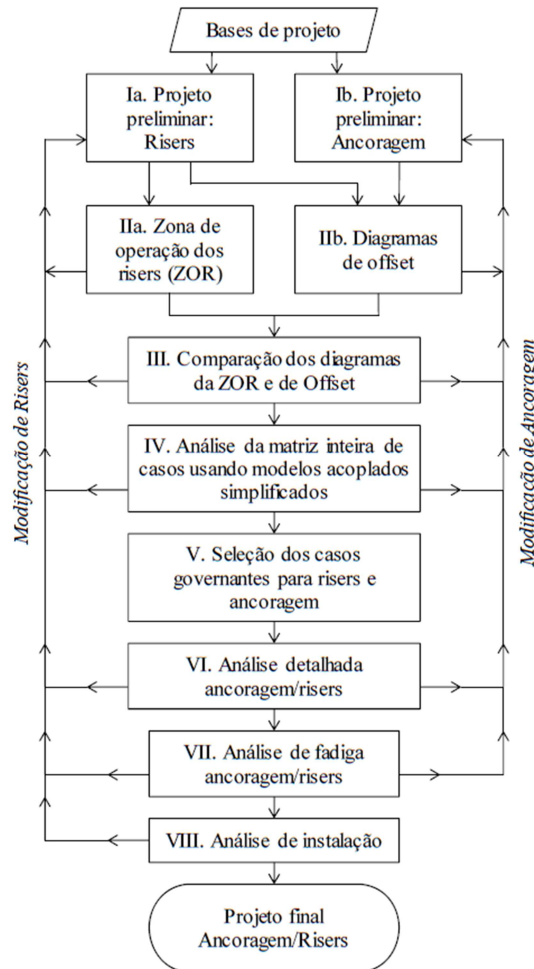


Figura 30: Fluxograma da metodologia PriAR [20].

Girón [20] dividiu a metodologia PriAR em três fases: Inicial, intermediária e avançada a partir do fluxograma acima.

Segundo Girón [20], a fase inicial é onde entram as Etapas Ia, IIa, Ib e Iib, onde as Etapas Ia e Ib são as primeiras propostas de configuração de *riser* e do sistema de ancoragem. Em seguida há o estabelecimento da Zona de Operação dos *Risers* (ZOR), que ocorre na Etapa IIa, e a geração do diagrama de offset para o sistema de ancoragem, etapa IIb.

Na fase intermediária, o autor apresentou as Etapas III, IV e V. Segundo Girón, esta fase se caracteriza pela interação entre os projetos do sistema de ancoragem e dos *risers*. Em outras palavras, nesta etapa inicia-se a integração das atividades dos projetos de ambas as estruturas. As atividades começam na Etapa III com o cruzamento ou sobreposição dos diagramas da ZOR e de offset (gerados previamente nas Etapas IIa e IIb respectivamente).

Após realizar a primeira interação e confirmar o adequado desempenho tanto dos *risers* quanto do sistema de ancoragem, procede-se a analisar todos os casos de carregamento de projeto na Etapa IV. Com o intuito de analisar a matriz inteira de casos, nesta etapa são utilizadas novamente simulações rápidas usando modelos acoplados simplificados e/ou estratégias de análise como, por exemplo, a formulação semi-acoplada. [20]

Em todos os casos analisados as trações das linhas de ancoragem são revisadas e os offsets da unidade flutuante são comparados com a ZOR.

Posteriormente, na Etapa V são estudados todos os resultados obtidos na etapa anterior para serem classificados de acordo às solicitações impostas ao sistema de ancoragem e aos *risers*.

A terceira e última fase é a avançada que utiliza o resultado das atividades anteriores da metodologia PriAR, ambos os sistemas ancoragem e *riser*, já foram analisados, foi verificado que os critérios de projeto foram atendidos e, além disso, os resultados foram cruzados com o intuito de aproveitar, por um lado, o conhecimento da área segura dos *risers* (ZOR) e, por outro, o conhecimento da complacência de passeios que o sistema de ancoragem permite à plataforma (diagramas de offset).

Girón designou que as atividades da fase avançada estariam voltadas para a realização das verificações detalhadas dos sistemas já propostos. Ainda nesta fase podem ser localizadas inconsistências que levam os projetistas a realizarem mudanças ou decidirem realizar ajustes.

Neste contexto, nos objetivos desta dissertação se inserem avaliar a influência do número de componentes de onda e o tipo de discretização, que seriam utilizadas nas etapas iniciais Ia e Ib, e a possibilidade de que em diferentes etapas seriam utilizados diferentes números de componentes, nesse caso na etapa Ia se teria um determinado número de componentes de onda diferente da etapa Ib. Esse estudo busca minimizar o número de componentes de onda e o tipo de discretização, exatamente para fazer com que as simulações fiquem cada vez mais rápidas, ainda com o objetivo de inserir as condições ambientais. Isto Viabilizaria também que as respostas de primeira e segunda ordem tenham diferentes números de componentes e de tipo de discretização. Com isso, possibilita-se um ganho em termos de custo computacional e precisão de resultado.

Na seção seguinte será realizado um estudo de caso com a plataforma de produção P-55, onde se espera alcançar o resultado da configuração com o melhor número de componentes para cada fase.

6 ESTUDOS DE CASO

6.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos os estudos comparativos dos métodos de discretização bem como a influência do número de componentes de onda para representação numérica de estados de mar irregulares com aleatoriedade.

O modelo será estudado no âmbito da formulação acoplada e analisado utilizando a ferramenta SITUA-Prosim, desenvolvida pela equipe do Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore. [14]

Conforme mencionado no capítulo 1, o objetivo deste trabalho é investigar 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.

Esta validação fica mais clara ao se pós-processar os sinais de movimento e/ou tração gerados no tempo em consequência da técnica de discretização pré-definida (número de componentes de onda e forma de discretização, conforme mencionado na seção 4), gerando, por exemplo, o espectro de energia a partir de um número grande de harmônicos utilizando a transformada discreta de Fourier; onde é possível obter os parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, extremos e etc.) além da própria forma do espectro.

Os procedimentos de discretização abordados nesse estudo foram apresentados no capítulo 4.6, que são os utilizados pelo programa PROSIM.

O programa Prosim, através do qual se realizaram todos os estudos de caso desta dissertação, foi desenvolvido pelo LAMCSO/PEC/COPPE/UFRJ em colaboração com a Petrobras/CENPES, desde o ano de 1997. Desde 1999, este vem sendo utilizado em diversos projetos na Petrobras. É orientado para a análise de unidades flutuantes ancoradas, considerando o acoplamento do casco com as linhas de ancoragem e *risers*, permitindo obter simultaneamente os movimentos da unidade flutuante e a resposta estrutural das linhas.

Os modelos numéricos do presente trabalho foram desenvolvidos através da ferramenta computacional SITUA-Prosim, 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 Prosim 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.

A plataforma P-55, ilustrada na Figura 31, é uma semissubmersível, situada no campo de Roncador, na Bacia de Campos, no Rio de Janeiro. Essa plataforma está ancorada a uma profundidade de cerca de 1,8 mil metros e ligada aos 17 poços, sendo 11 produtores e seis injetores de água.



Figura 31: Imagem da plataforma P-55 e do modelo truncado de 4 linhas utilizado. [7]

Neste trabalho, foi empregado o espectro JONSWAP (Chakrabarti, 1987; DNV, 2010) com $H_s = 7,8\text{m}$, $T_z = 15,6\text{s}$ e Gama (parâmetro de pico) = 1.66 (Figura 31):

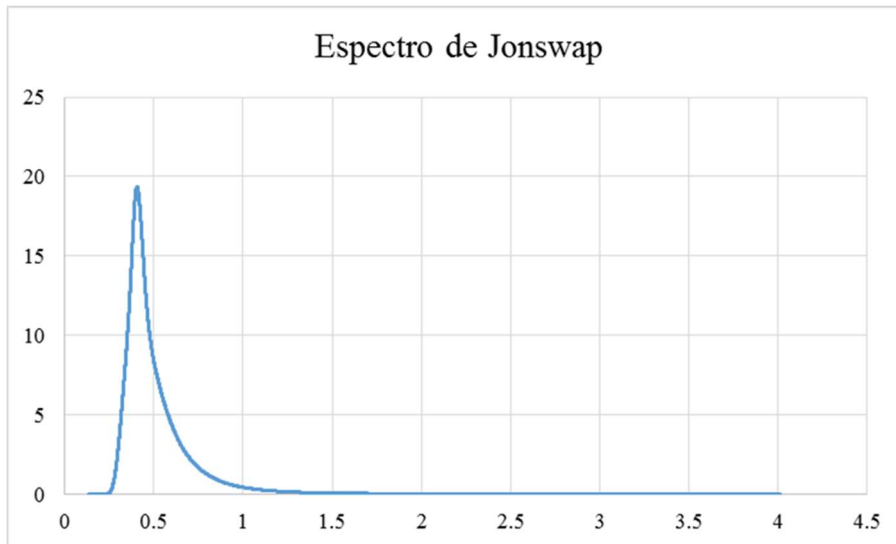


Figura 32: Espectro de Jonswap.

Para a melhor interpretação dos espectros discretizados é importante conhecer o RAO do modelo utilizado. A seguir serão apresentados os RAOs de *Surge*, *Heave* e *Pitch* da Semi-Submersível estudada (Figura 33, Figura 34 e Figura 35).

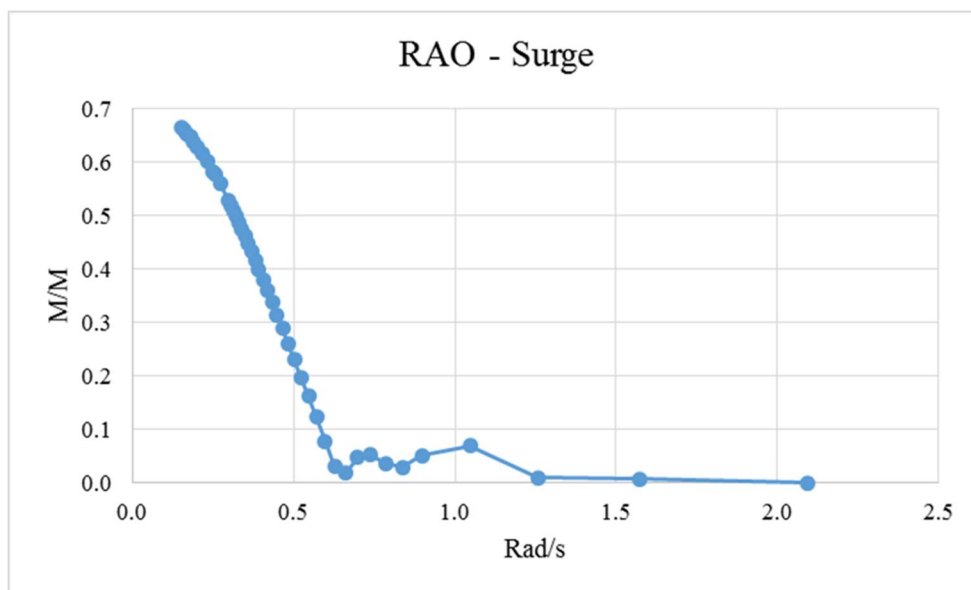


Figura 33: RAO de força do Surge.

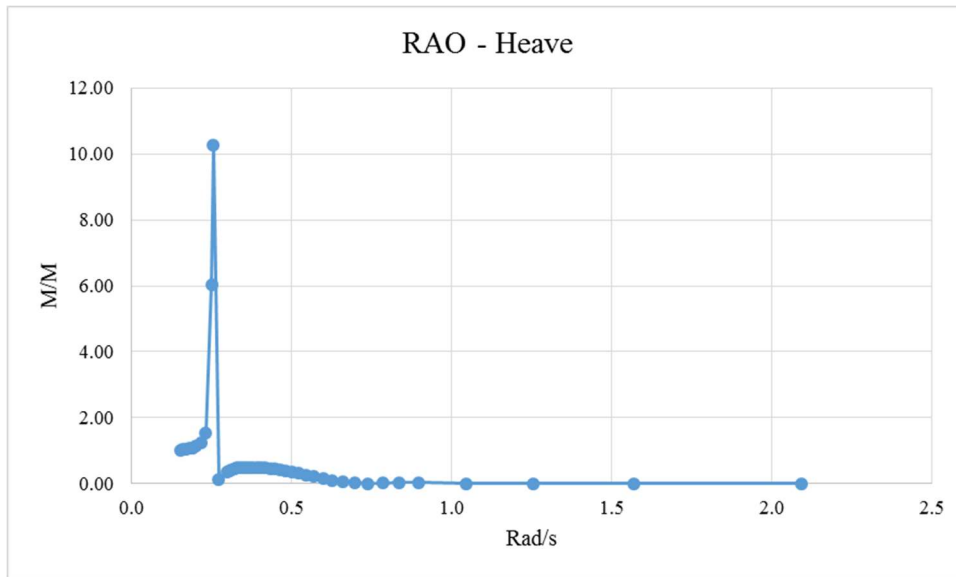


Figura 34: RAO de força do Heave.

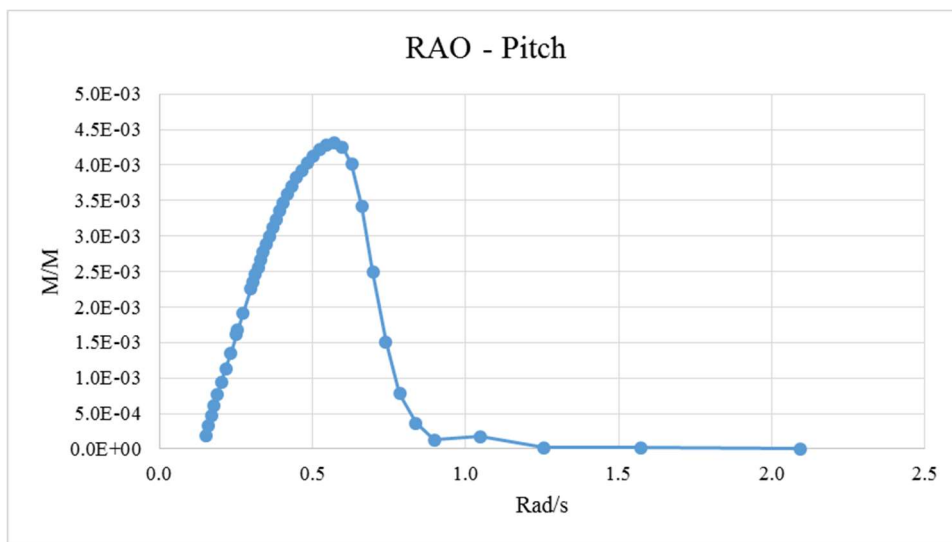


Figura 35: RAO de força do Pitch.

Deste modo, foram realizados estudos que se baseiam em comparar os quatro diferentes procedimentos de discretização do espectro de mar mencionados na seção 4.6 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 o número de componentes e tipos de discretização que podem ser utilizados em projetos de *risers* e ancoragens, bem como na metodologia de projeto integrado PrIAR, mencionado na seção

5.5. O tempo de simulação para todos os casos que serão apresentados a seguir foi de 10800s.

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).

A seguir serão apresentadas seções onde serão separados os tipos de discretização: intervalo de frequência constante com amostragem aleatória; amplitude constante; intervalo de períodos constantes e intervalos de períodos constantes com amostragem aleatória. Em cada uma delas serão apresentados os gráficos dos espectros que resultaram das simulações realizadas no Situa-Proxim. Também será apresentada a influência na primeira e segunda ordem de movimento, na tração de uma linha do sistema de ancoragem e *riser*, além do custo computacional envolvido.

6.2 Influência do Tipo De Discretização por Número de Componentes de Onda

Nesse estudo de caso será realizada uma comparação em relação ao número de componentes utilizados para cada tipo de discretização descrita no capítulo 4.6. Para esse estudo foram realizadas simulações acopladas com diferentes números de componentes de onda, como mencionado anteriormente.

Para essa primeira análise, os gráficos foram elaborados a partir do tipo de discretização e contendo em cada figura os diferentes números de componentes estudados. Espera-se que o aumento do número de componentes de onda leve a uma melhor discretização do espectro, pois se reduzem os “ruídos” no espectro pós-processado a partir da série de elevações, ou seja, esses sinais levam a espectros recuperados mais suaves, de modo a representar melhor o mar irregular especificado pela distribuição de energia do espectro teórico. Com isso, espera-se que o espectro de 600 componentes seja o mais preciso. Então em todos os estudos se utilizará o espectro de 600 componentes de onda parâmetro.

6.2.1 Intervalos de Frequência Constantes, Com amostragem Aleatória

Primeiramente serão apresentadas as alturas de onda resultantes do processo de discretização de espectro para os diferentes números de componentes de onda. Essas alturas de ondas foram geradas a partir das simulações realizadas com o programa Prosim.

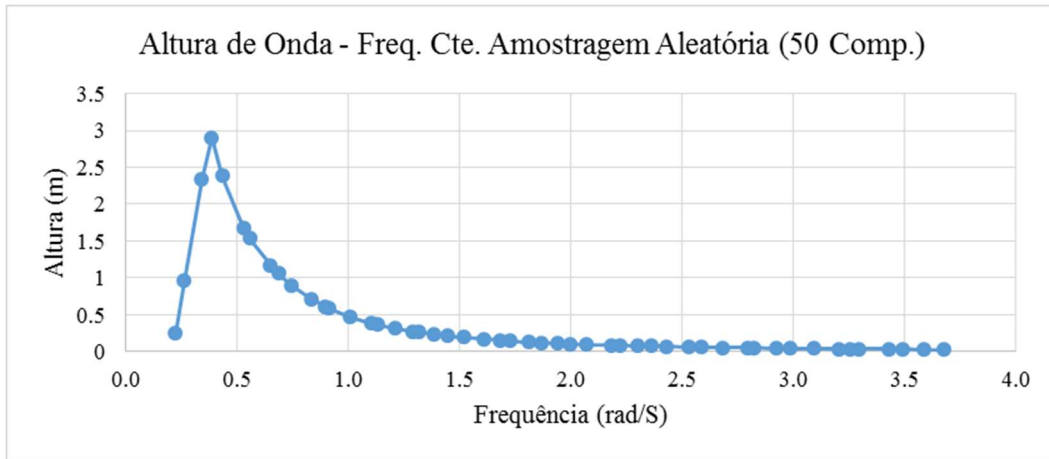


Figura 36: Altura de Onda, 50 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.

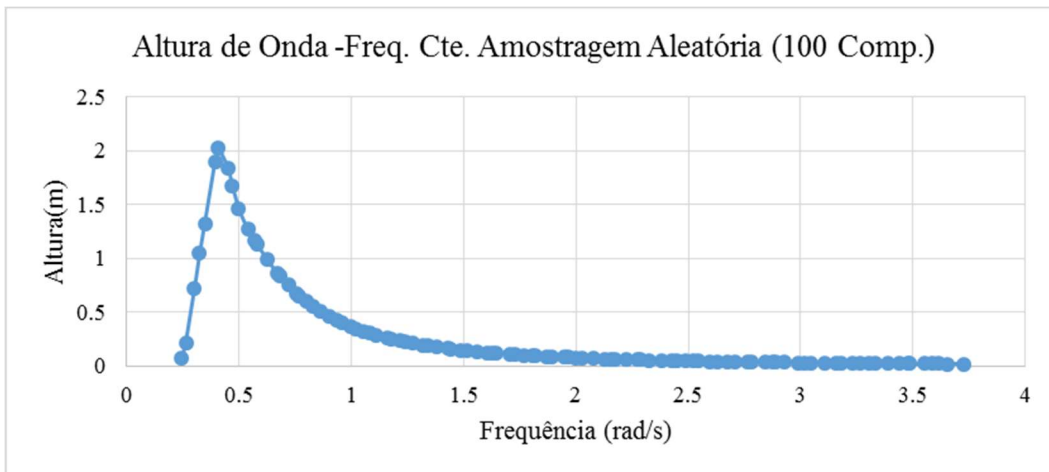


Figura 37: Altura de Onda, 100 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.

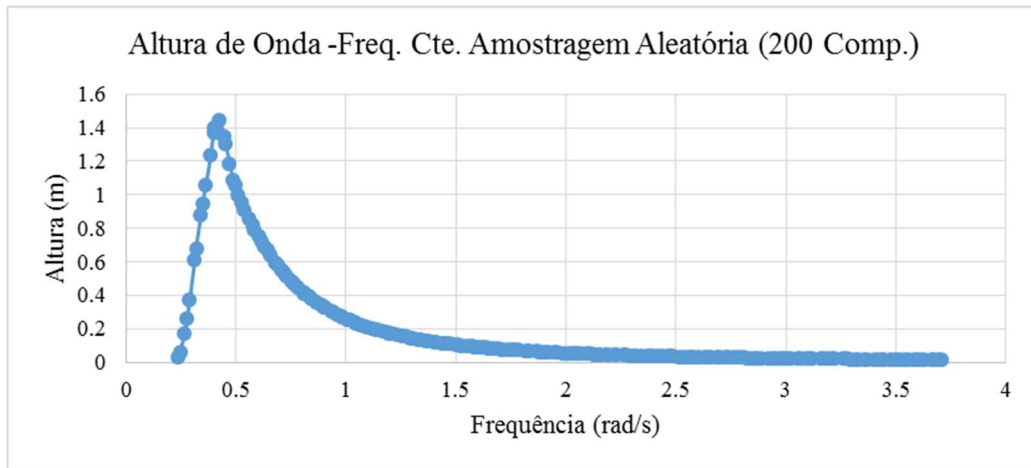


Figura 38: Altura de Onda, 200 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.

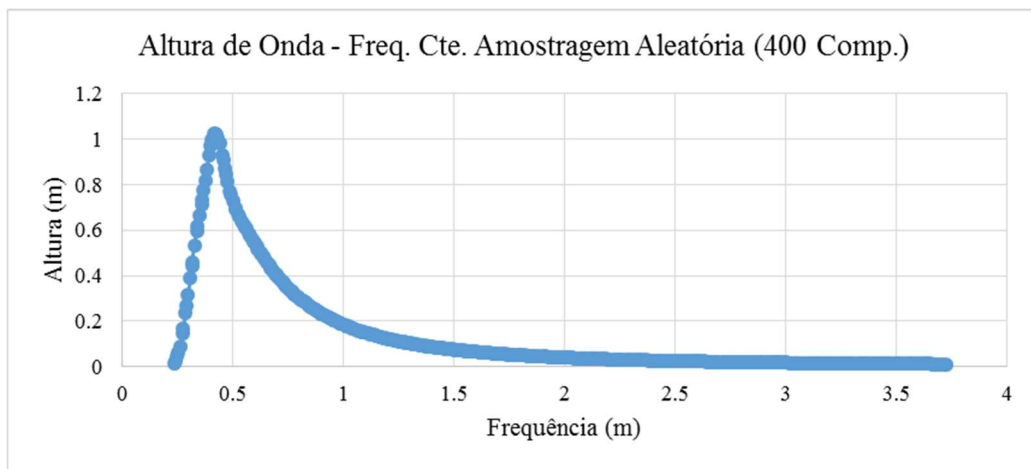


Figura 39: Altura de Onda, 400 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.

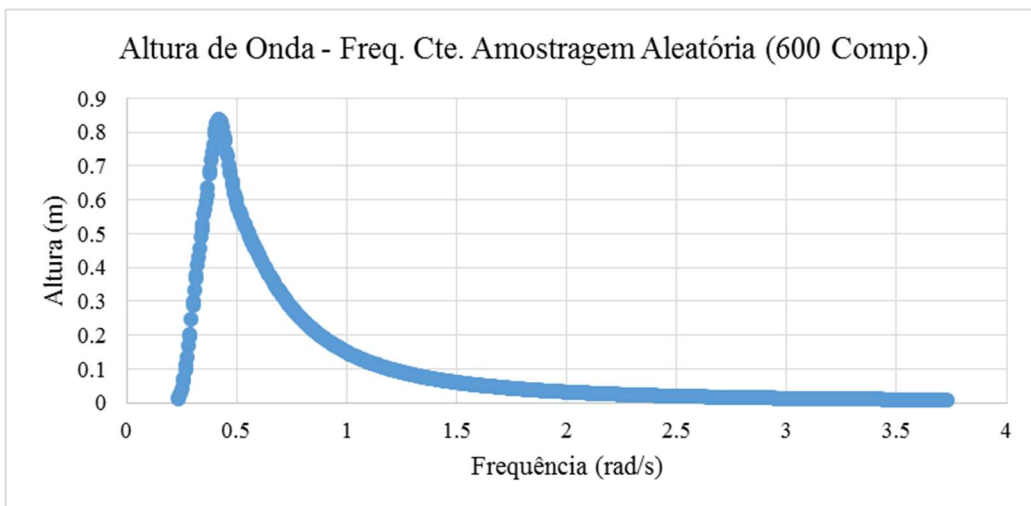


Figura 40: Altura de Onda, 600 Componentes, Frequência Constante Amostragem Aleatória.

Nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43, é apresentado o espectro de surge para frequência constante com amostragem aleatória, obtido das simulações e seus respectivos

processamentos, onde pode ser observado o comportamento da resposta da 1ª e 2ª ordem com diferentes números de componentes de onda.

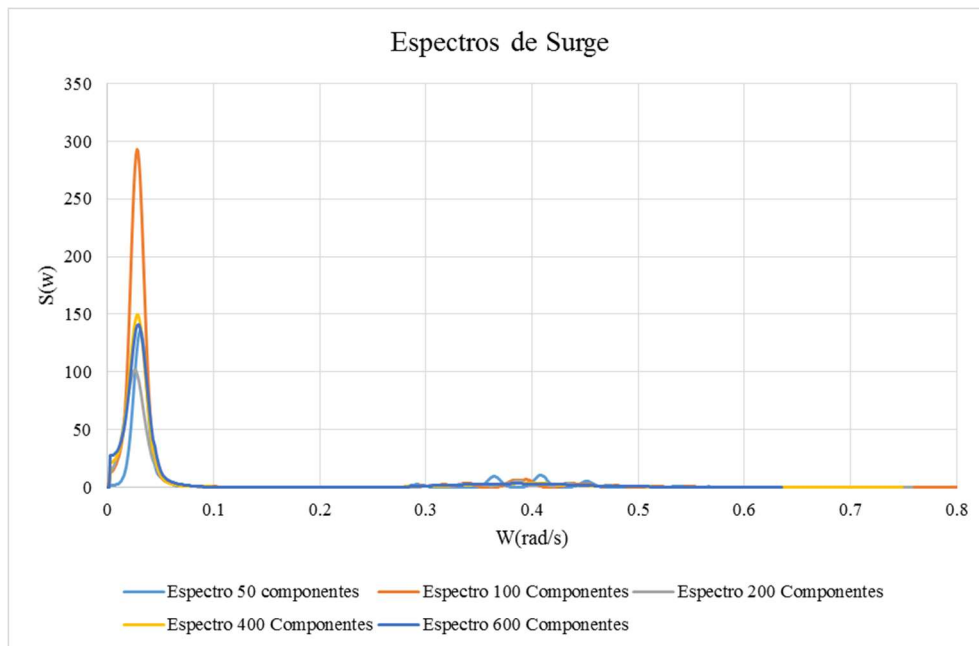


Figura 41: Espectro surge, Intervalo de Frequência Constantes, com frequência Aleatória.

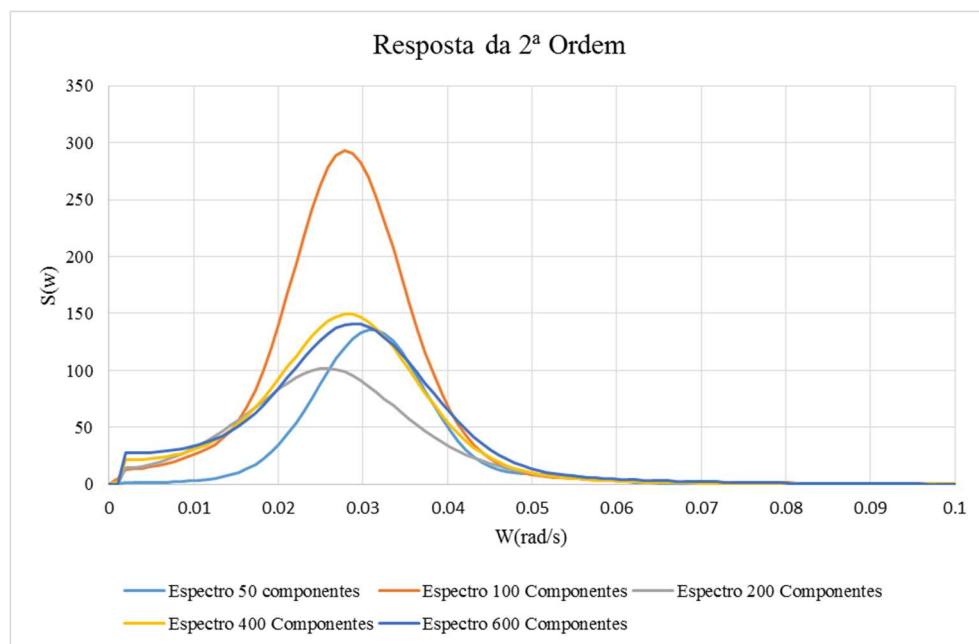


Figura 42: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Frequência Constantes, com frequência Aleatória.

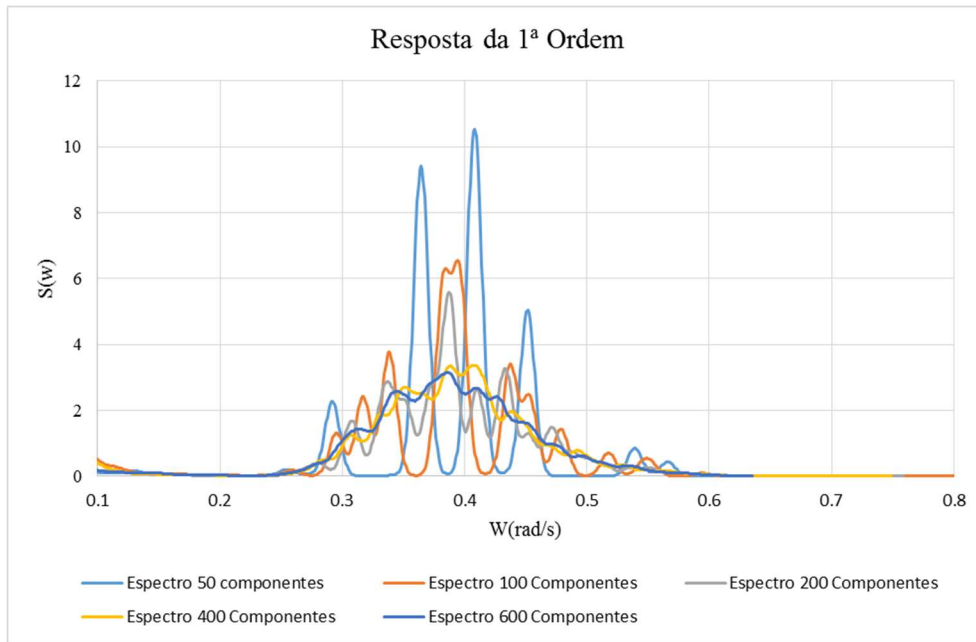


Figura 43: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Frequência Constantes, com frequência Aleatória.

A partir dos gráficos exibidos, pode-se perceber que nesse tipo de discretização de espectro da onda, o que melhor converge para o patamar de energia do parâmetro é o espectro com 400 componentes tanto para a 2ª ordem quanto para a 1ª ordem.

Dois gráficos a seguir apresentam os espectros de *Heave*, que é o movimento de maior influência nos esforços do *risers*, e *Pitch*, que tem relevância na resposta estrutural do *riser*.

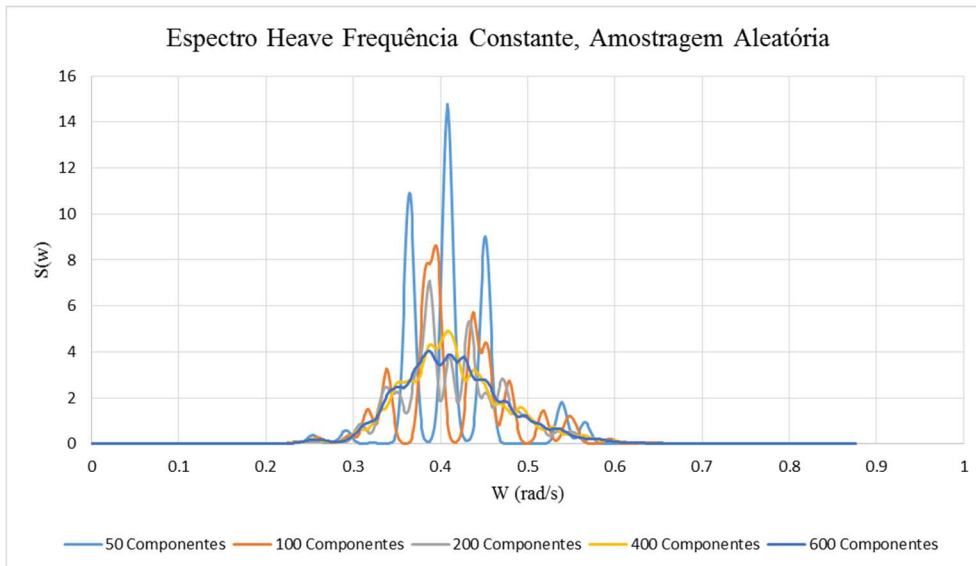


Figura 44: Espectro Heave, Intervalo de Frequência Cte. Com Amostragem Aleatória.

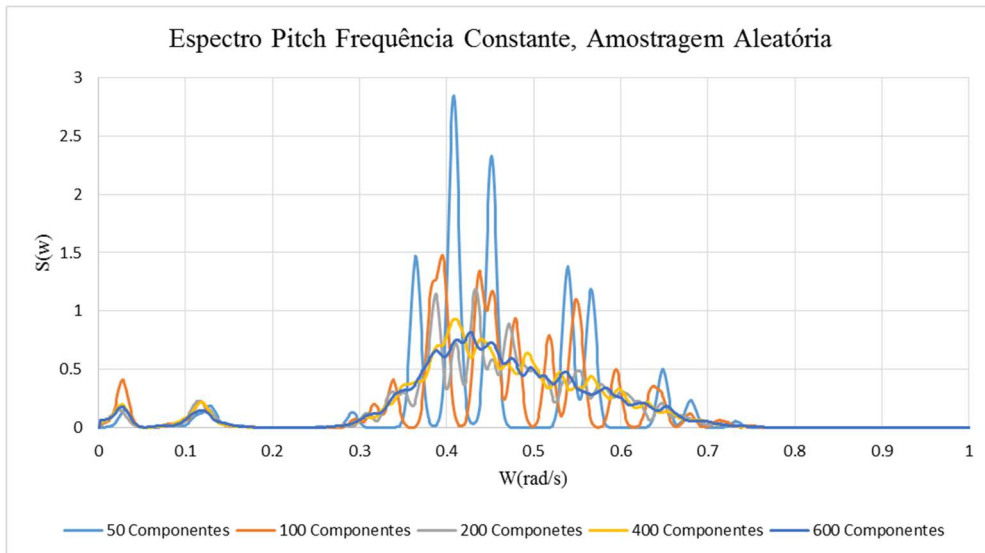


Figura 45: Espectro Pitch, Frequência Cte. Amostragem Aleatória.

De acordo com o exposto nas figuras acima, pode ser observado que para a discretização de frequência constante com amostragem aleatória, a configuração de 400 componentes seria recomendada para dar bons resultados das respostas de 1ª e 2ª ordem. Porém como o intuito desse estudo é de diminuir o custo computacional, essa discretização não se mostra satisfatória.

6.2.2 Amplitudes Constantes

Como apresentado na seção anterior, para esse tipo de discretização teremos as alturas de onda resultantes do processo de discretização de espectro, para os diferentes números de componentes de onda.

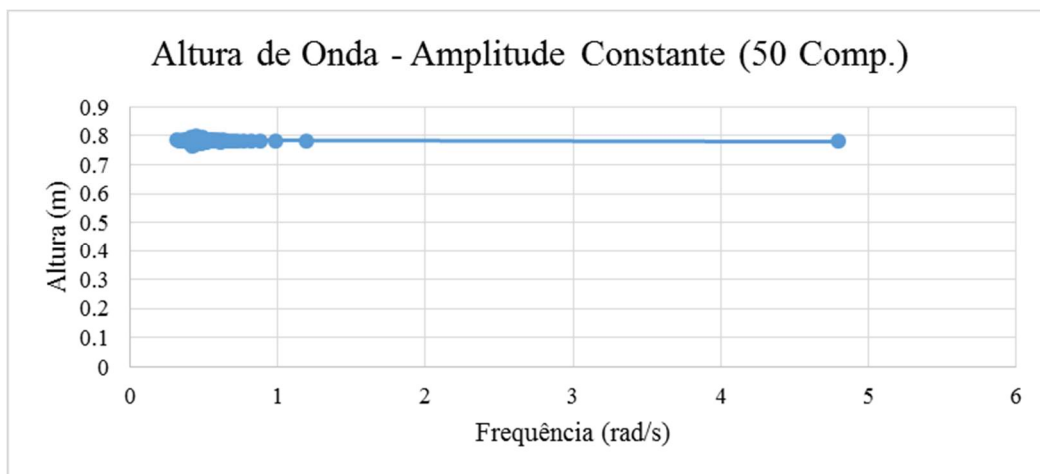


Figura 46: Altura de Onda, 50 Componentes, Amplitude Constante.

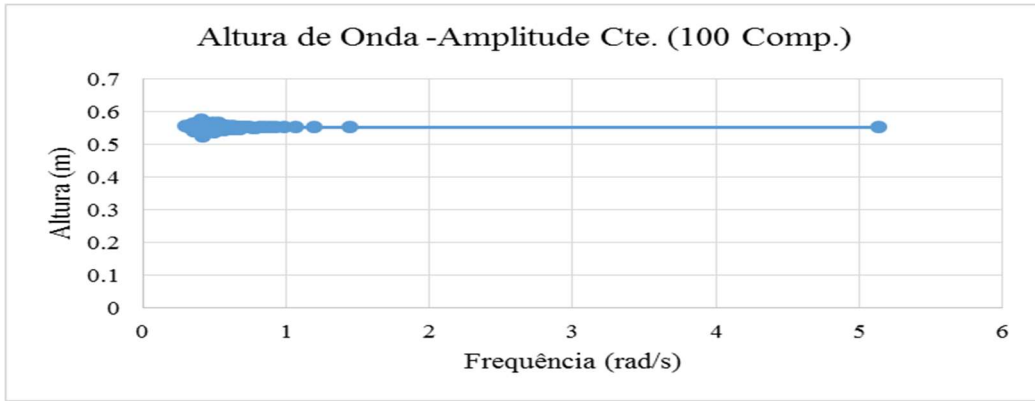


Figura 47: Altura de Onda, 100 Componentes, Amplitude Constante.

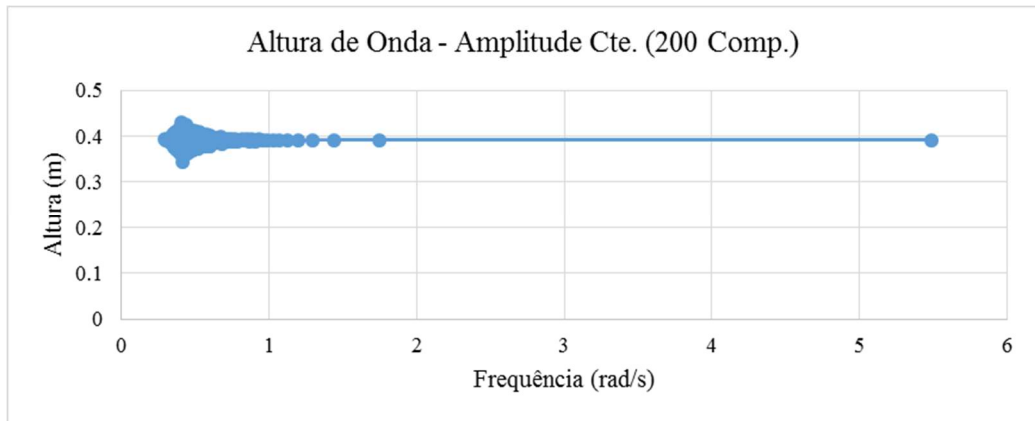


Figura 48: Altura de Onda, 200 Componentes, Amplitude Constante.

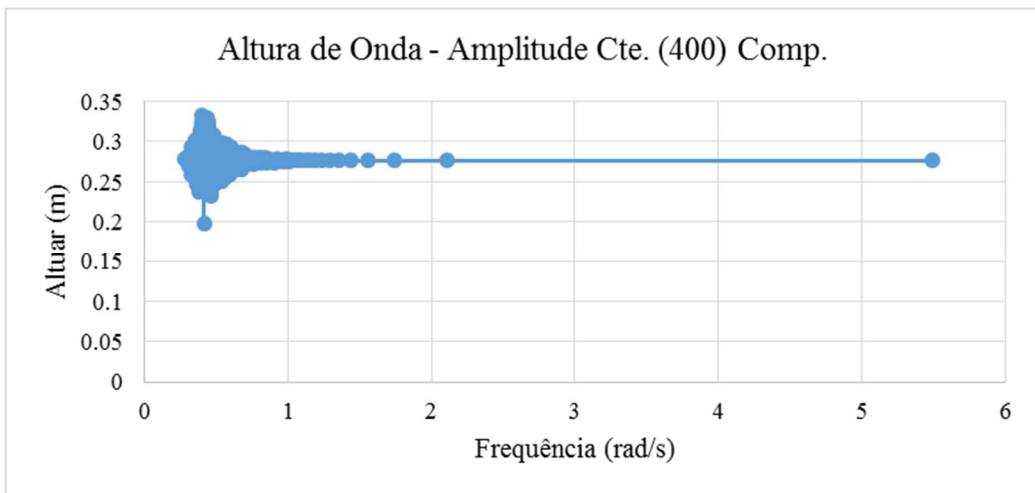


Figura 49: Altura de Onda, 400 Componentes, Amplitude Constante.

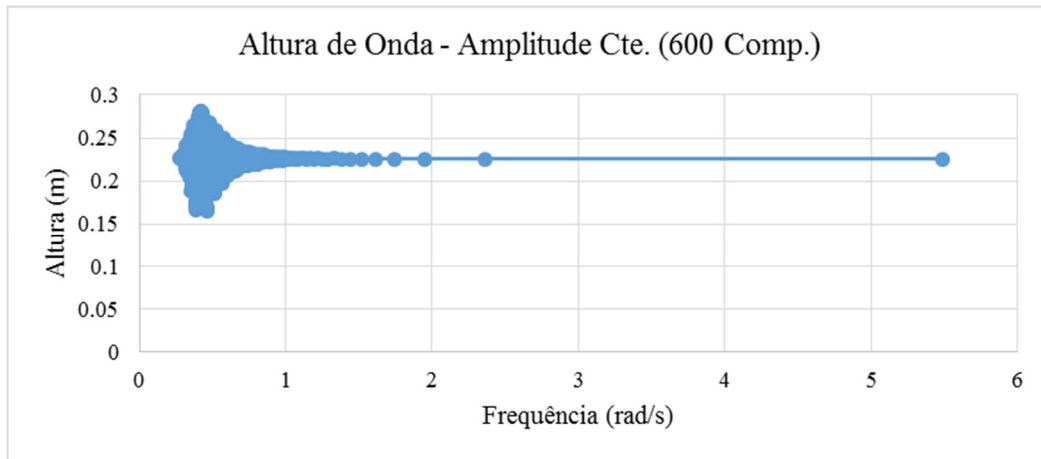


Figura 50: Altura de Onda, 600 Componentes, Amplitude Constante.

Figura 51, Figura 52 e Figura 53, representam os espectros de surge para amplitude constante, com diferentes números de componentes, de onde será explicitado o comportamento da resposta da 1ª e 2ª ordem, conforme a variação do número de componentes utilizada no estudo.

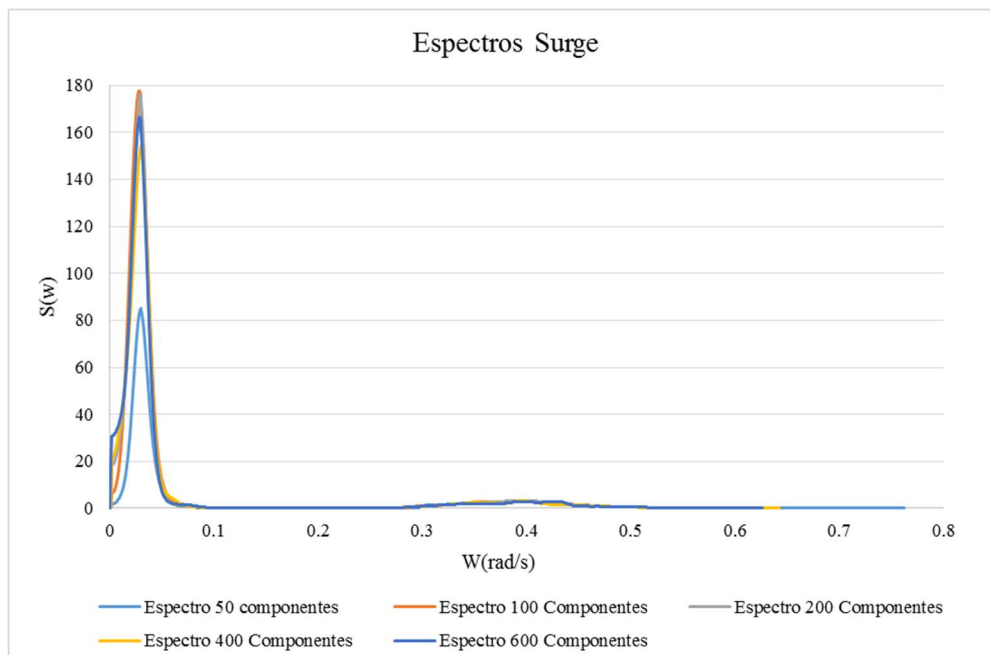


Figura 51: Espectro surge, Intervalo de Amplitude Constante.

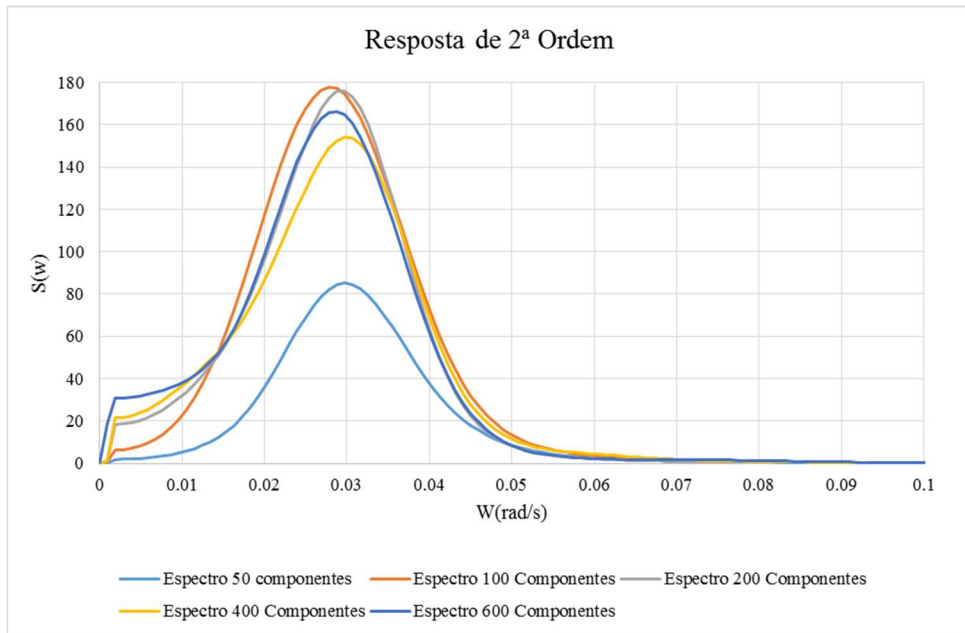


Figura 52: Resposta da 2ª Ordem, Intervalo de Amplitude Constante.

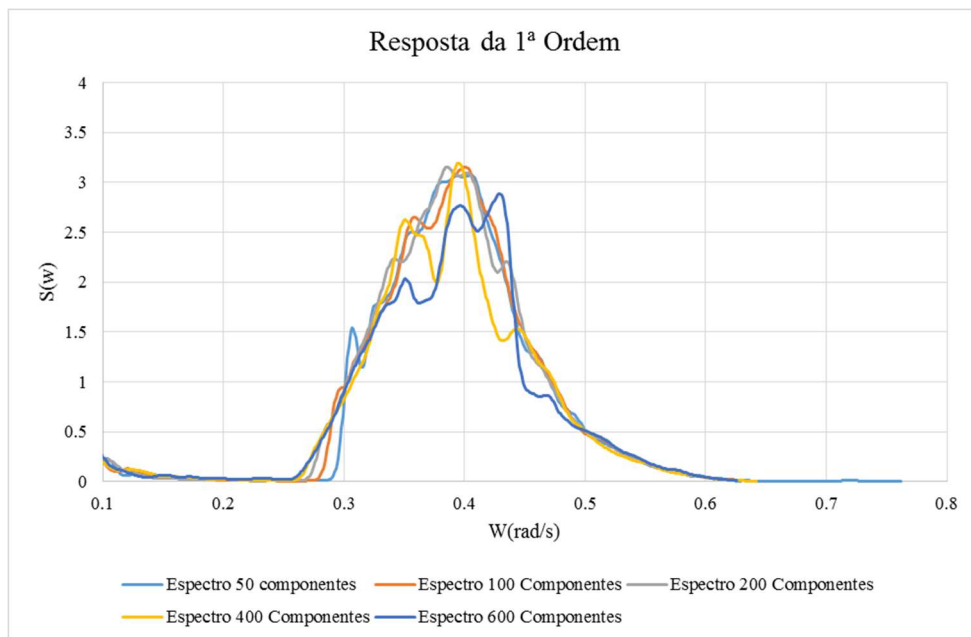


Figura 53: Resposta da 1ª Ordem, Intervalo de Amplitude Constante.

Nas figuras apresentadas podemos notar que a discretização com 50 componentes é a única se distancia do patamar de energia do nosso parâmetro de 600 componentes na resposta da 2ª ordem, o que já seria esperado, pois possui menos componentes com isso uma discretização mais pobre.

Os gráficos a seguir apresentam a comparação dos diferentes números de componentes com os espectros de *Heave*, *Pitch* para a discretização de amplitude constante.

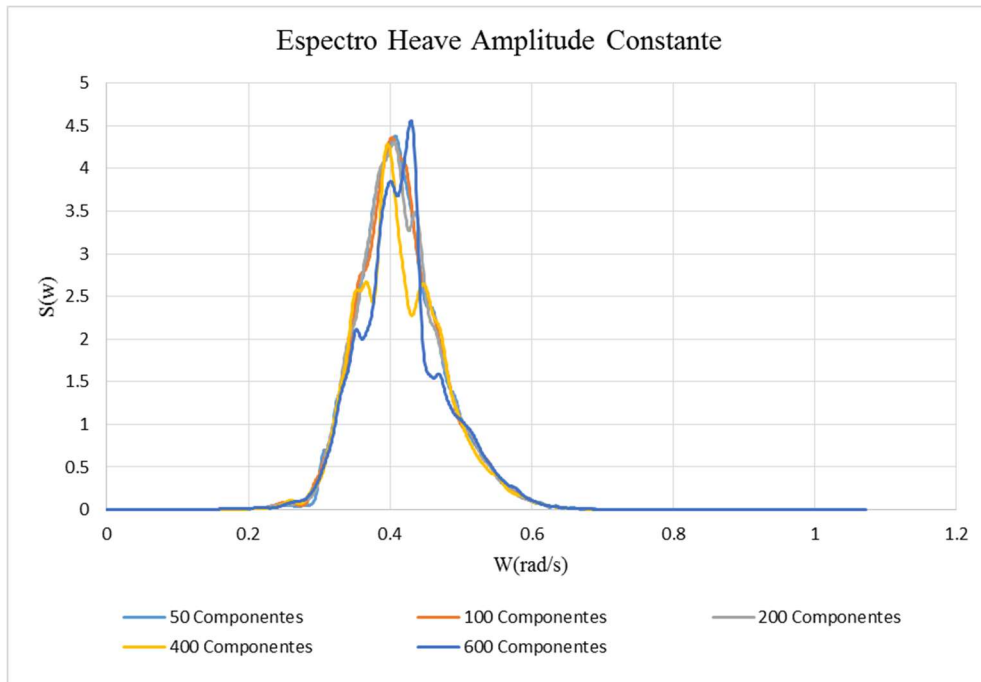


Figura 54: Espectro Heave, Amplitude Constante.

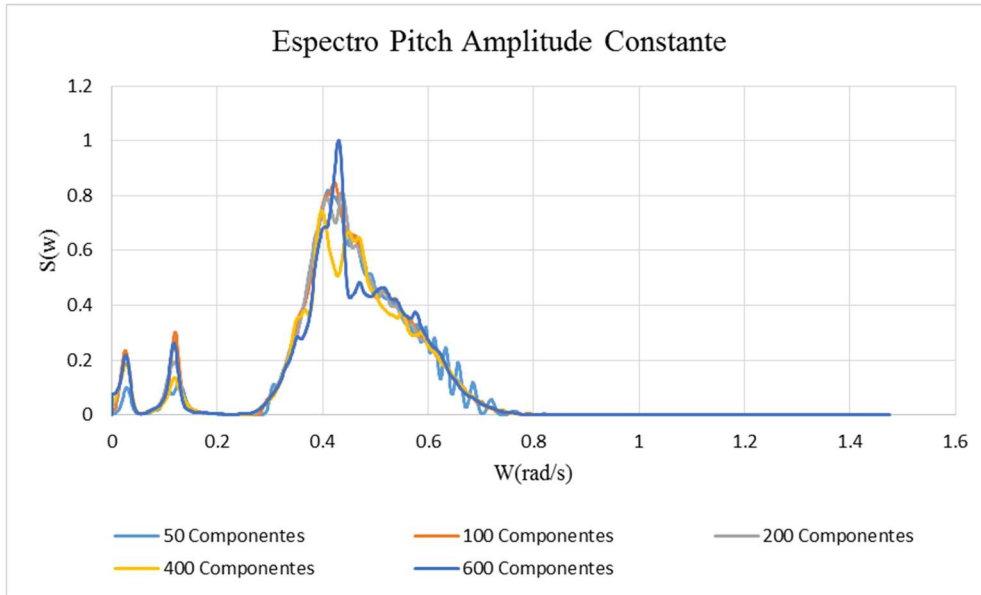


Figura 55: Espectro Pitch, Amplitude Constante.

Com os resultados de amplitude constante, pode-se observar que para a 2ª ordem apenas a discretização com 50 componentes se distancia das demais componentes, logo, não seria o número de componentes indicado para representar tipo de movimento. Porém,

para o movimento de 1ª ordem todos os números de componente apresentaram resultados satisfatórios, como pode ser visto também nos espectros de Heave e Pitch.

6.2.3 Intervalos de Períodos Constantes

Para período constante, também será apresentado as alturas de onda resultante do processo de discretização de espectro, para os diferentes números de componentes de onda.

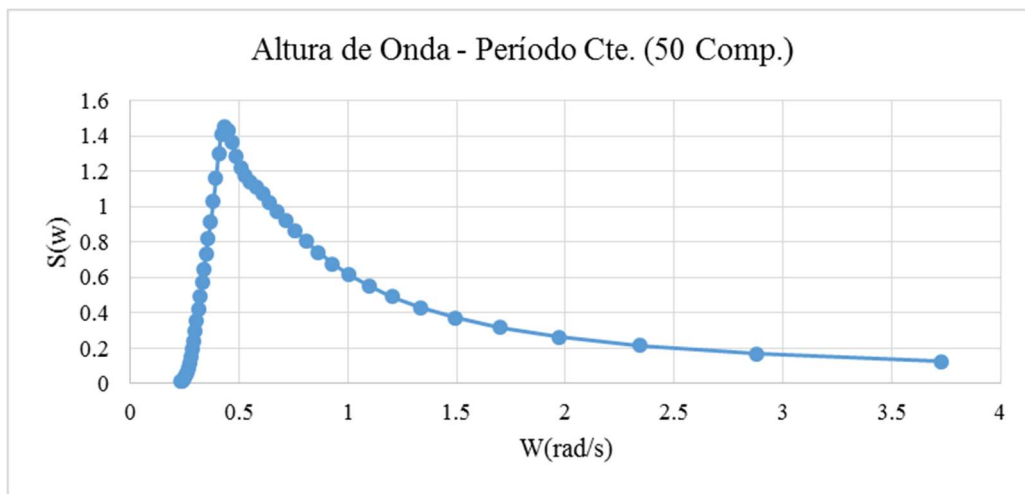


Figura 56: Altura de Onda, 50 Componentes, Período Constante.

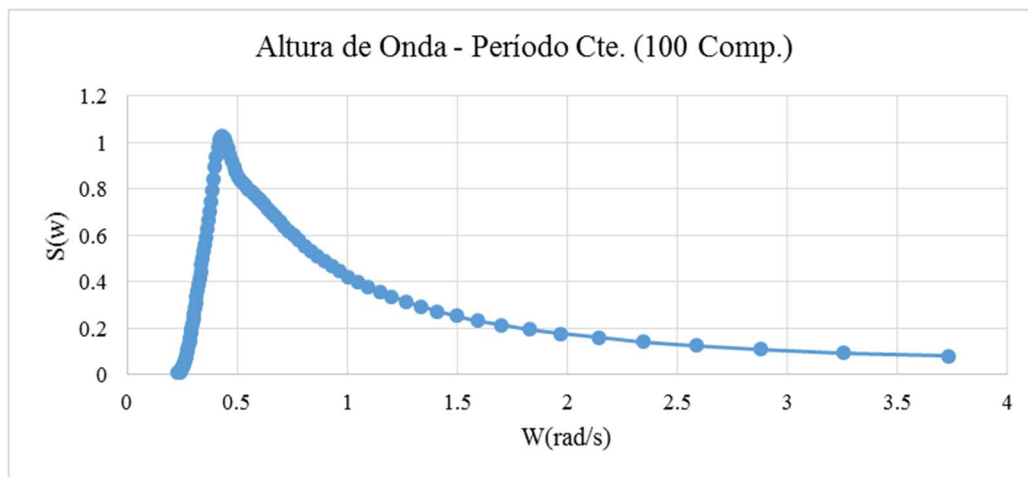


Figura 57: Altura de Onda, 100 Componentes, Período Constante.

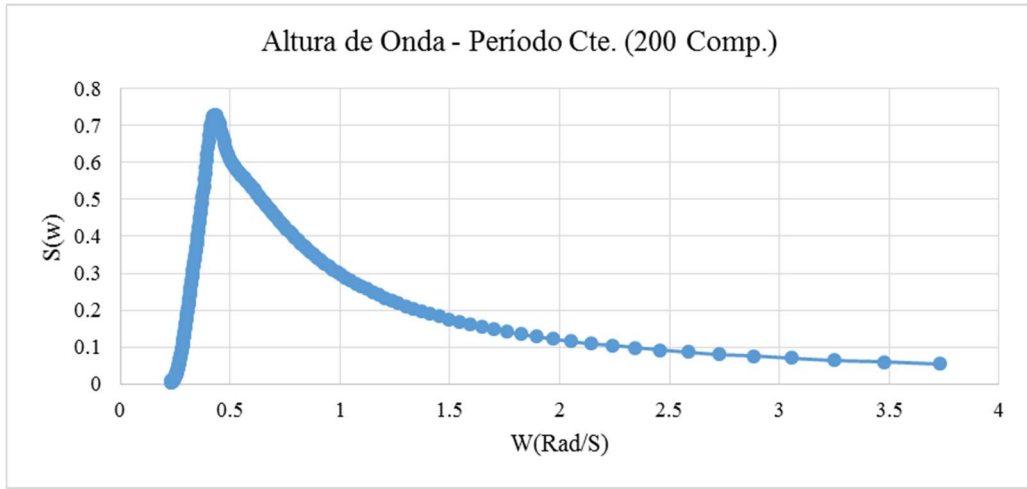


Figura 58: Altura de Onda, 200 Componentes, Período Constante.

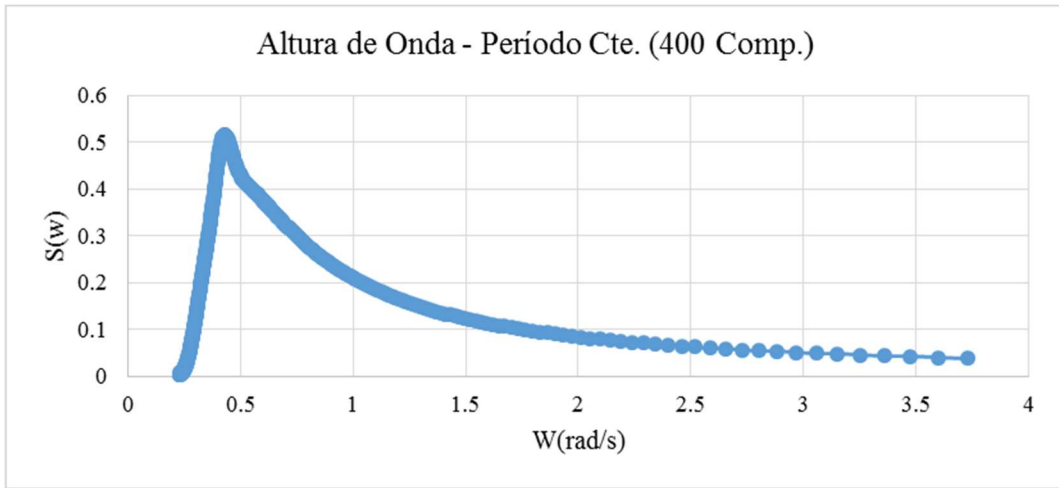


Figura 59: Altura de Onda, 400 Componentes, Período Constante.

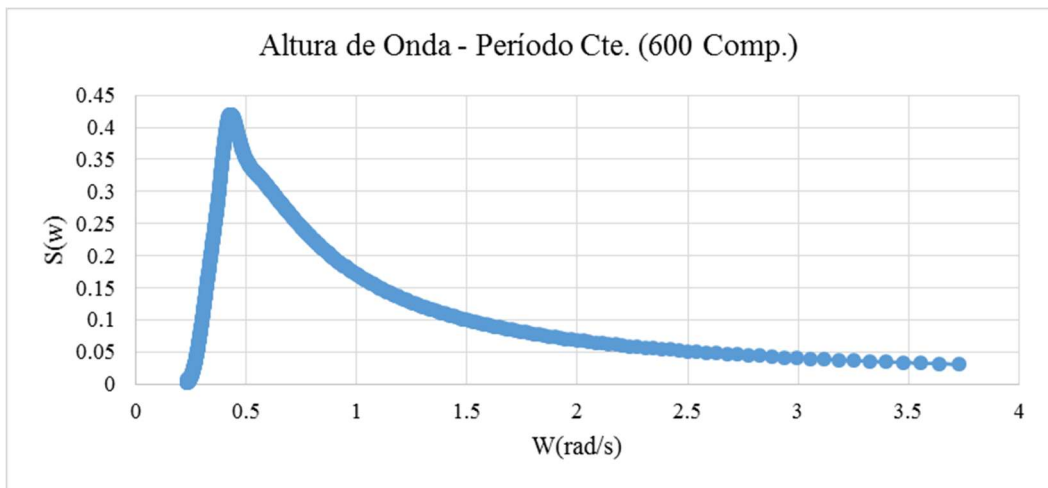


Figura 60: Altura de Onda, 600 Componentes, Período Constante.

Nas Figura 61, Figura 62 e Figura 63, é apresentado o espectro de surge para período constante, onde pode ser observado o comportamento da resposta da 1ª e 2ª ordem, conforme se varia o número de componentes utilizada.

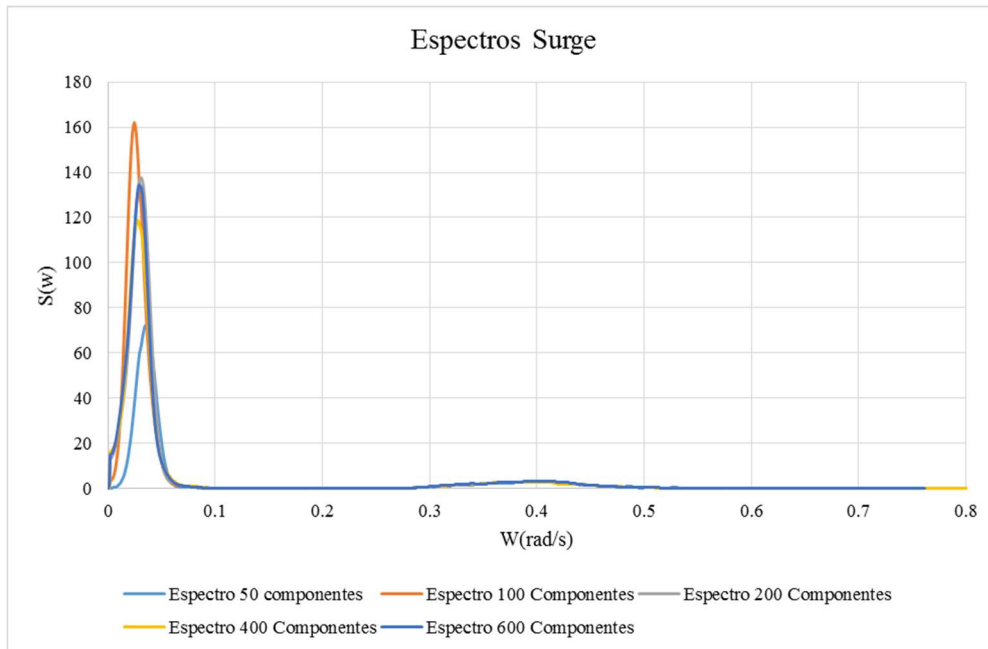


Figura 61: Espectro surge, Intervalo de Período Constante.

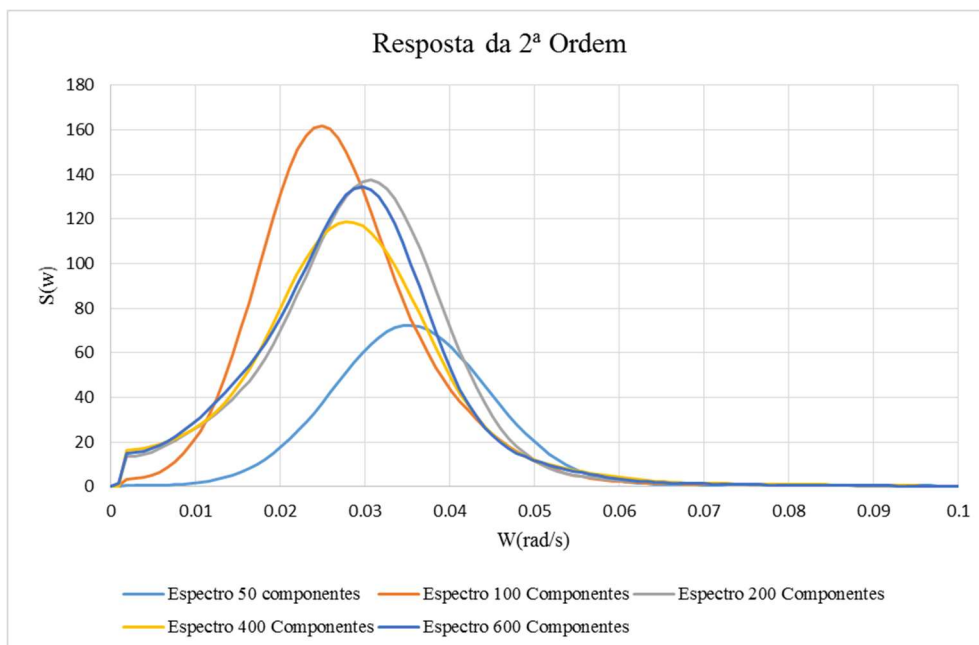


Figura 62: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Período Constante.

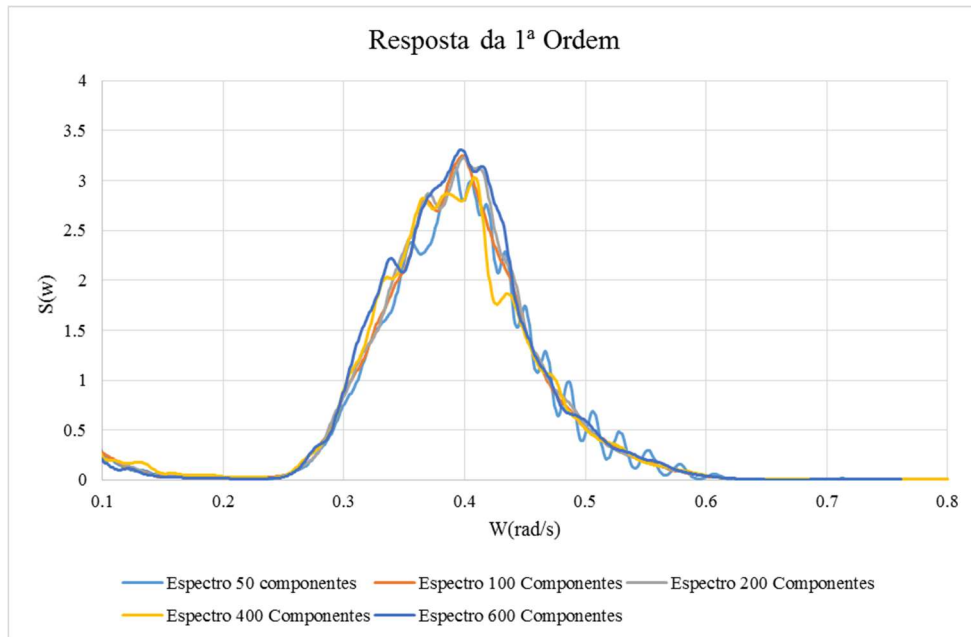


Figura 63: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Período Constante.

Analisando a Figura 62 pode-se perceber que a partir da discretização com 200 componentes é onde começamos a obter um resultado satisfatório para a 2ª ordem.

Na Figura 63, é apresentada a resposta da primeira ordem, onde podemos ver que todas as diferentes configurações apresentam resultados satisfatórios, pois todos se encontram próximo ao patamar (600 componentes).

Os gráficos a seguir apresentam a comparação dos diferentes números de componentes com os espectros de *Heave*, *Pitch* e *Roll* para a discretização de amplitude constante.

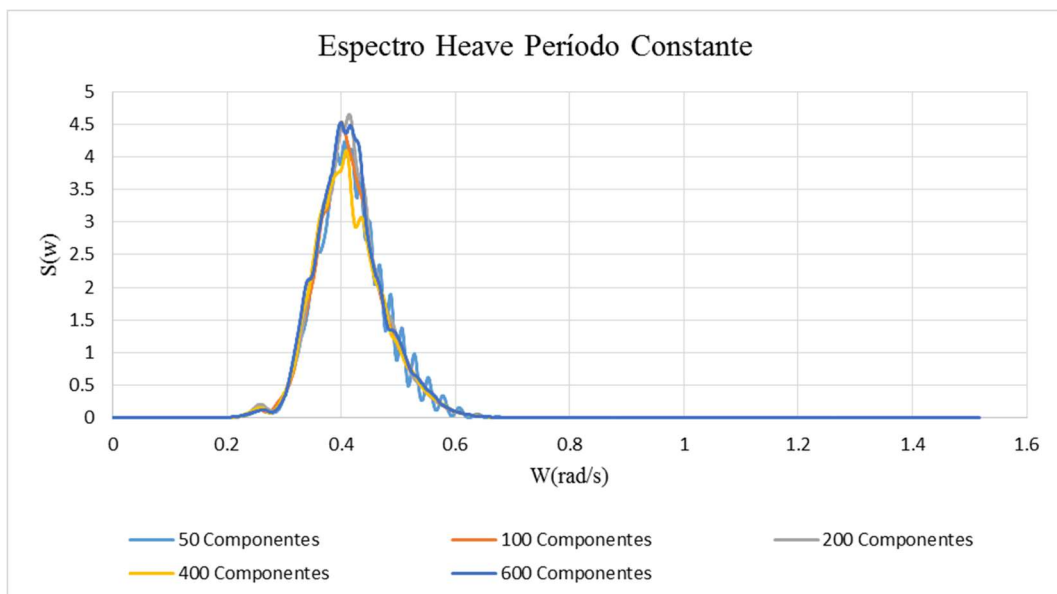


Figura 64: Espectro Heave, Período Constante.

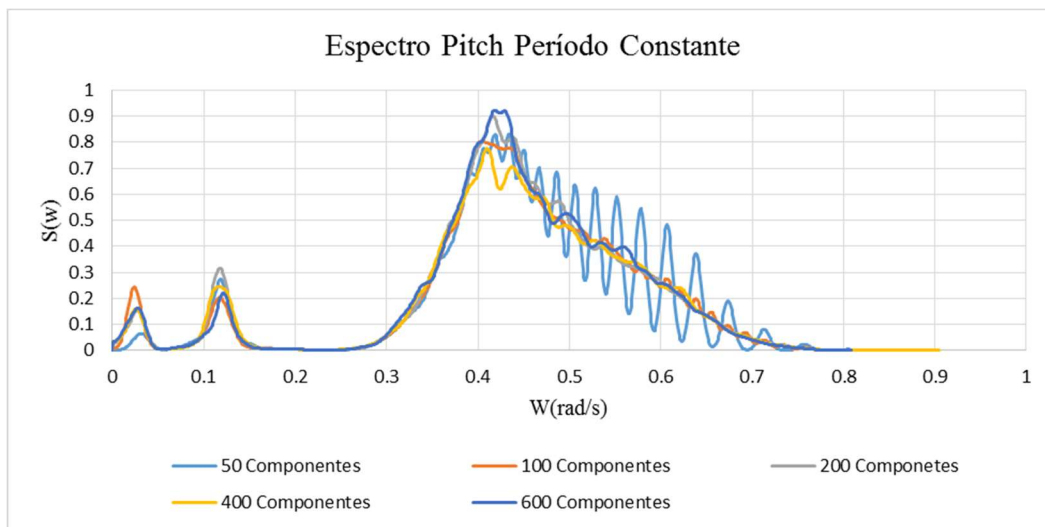


Figura 65: Espectro Pitch, Período Constante.

De acordo com o exposto, podemos dizer que para a discretização de período constante a configuração a partir de 200 componentes seria recomendada para dar bons resultados da resposta de 2ª ordem. Porém como analisamos a 1ª ordem separadamente, com 50 componentes já apresenta resultados satisfatório.

6.2.4 Intervalos de Períodos Constantes, com Amostragem Aleatória

Serão apresentadas as alturas de onda resultante do processo de discretização de espectro, para os diferentes números de componentes de onda.

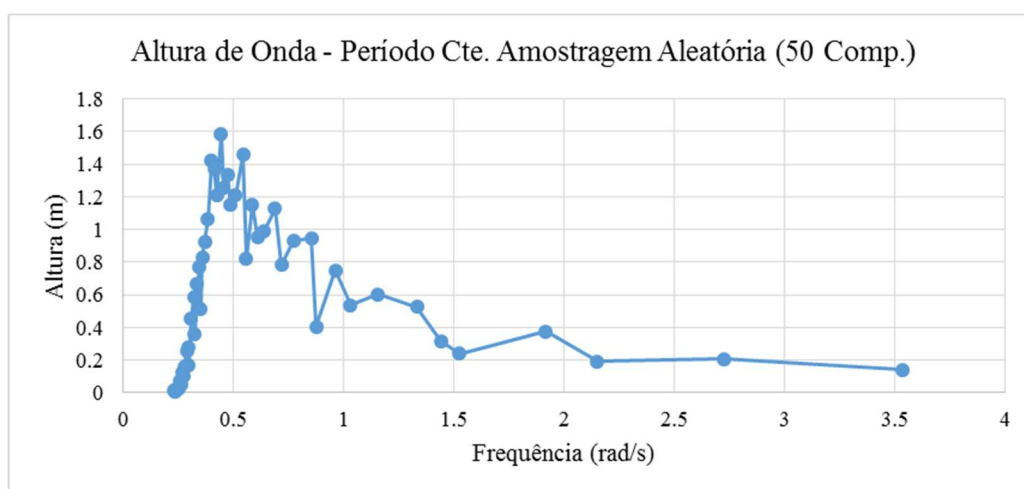


Figura 66: Altura de Onda, 50 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.

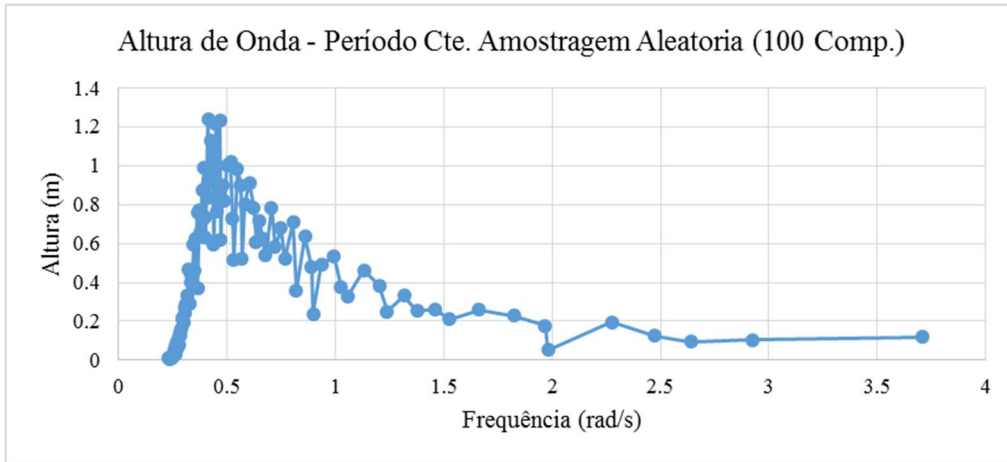


Figura 67: Altura de Onda, 100 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.

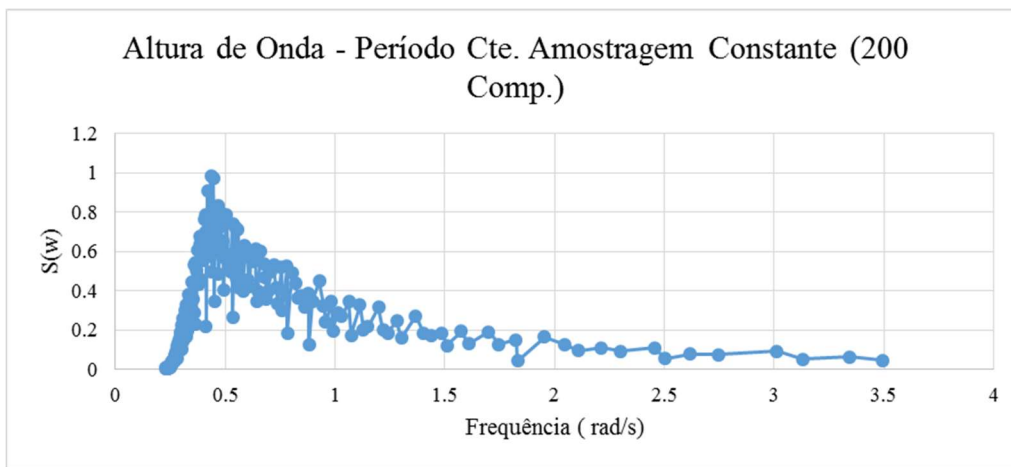


Figura 68: Altura de Onda, 200 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.

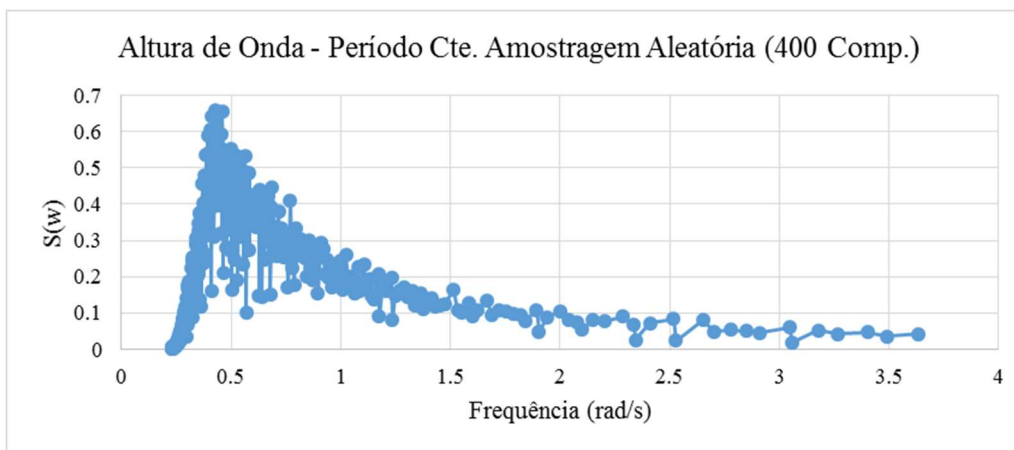


Figura 69: Altura de Onda, 400 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.

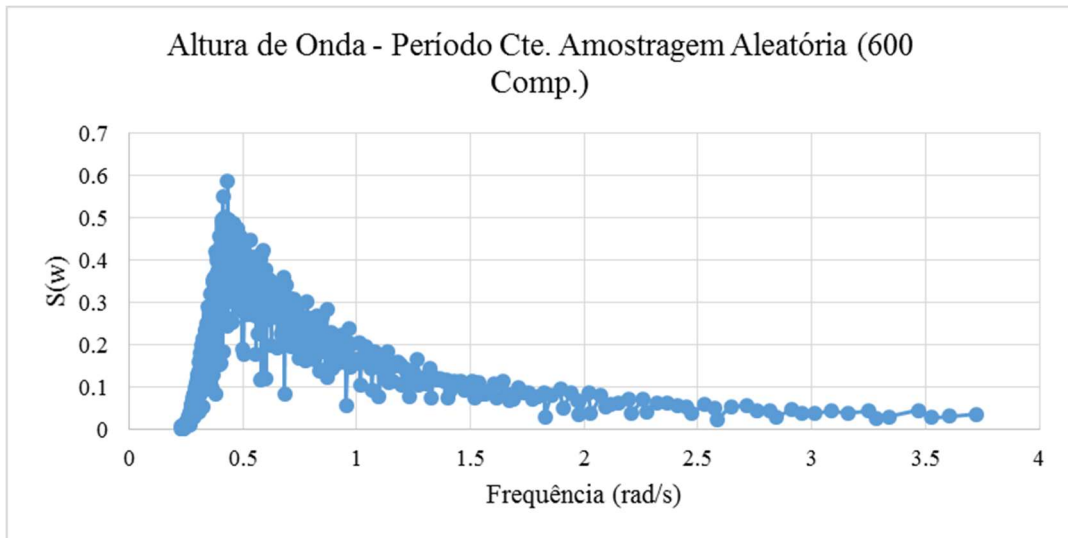


Figura 70: Altura de Onda, 600 Componentes, Período Constante amostragem Aleatória.

Em todas as Figuras, que apresentam as alturas de onda com período constante e amostragem aleatória, é possível observar uma nítida oscilação das amplitudes com a frequência, que podem ser oriundas dos $\Delta\omega$ aleatório da técnica de discretização.

Nas Figura 71, Figura 72 e Figura 73, é apresentado o espectro de surge para período constante com amostragem aleatória, onde pode ser observado o comportamento da resposta da 1ª e 2ª ordem, conforme se varia o número de componentes utilizados.

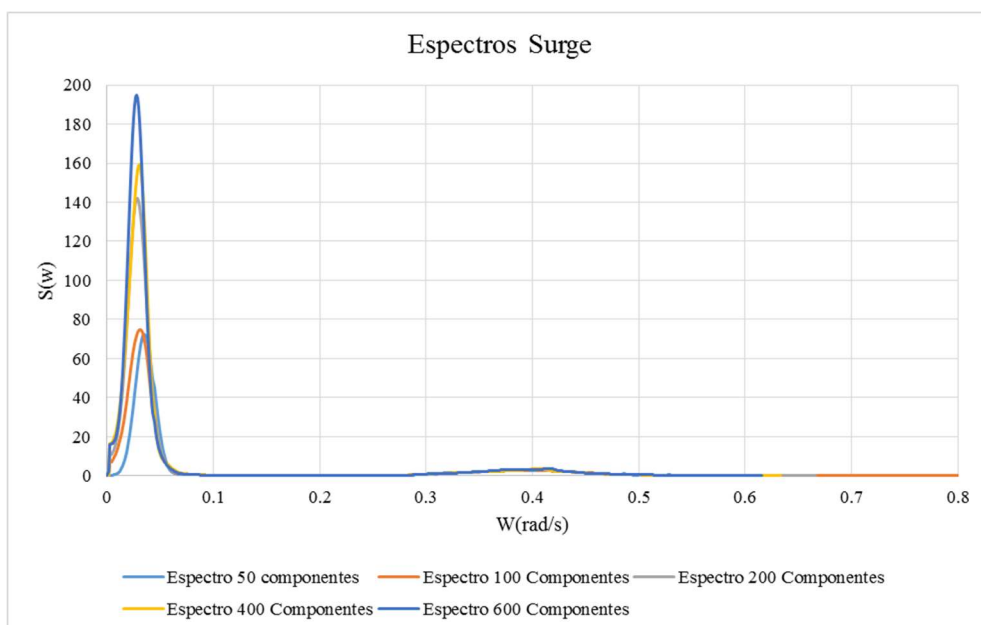


Figura 71: Espectro surge, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.

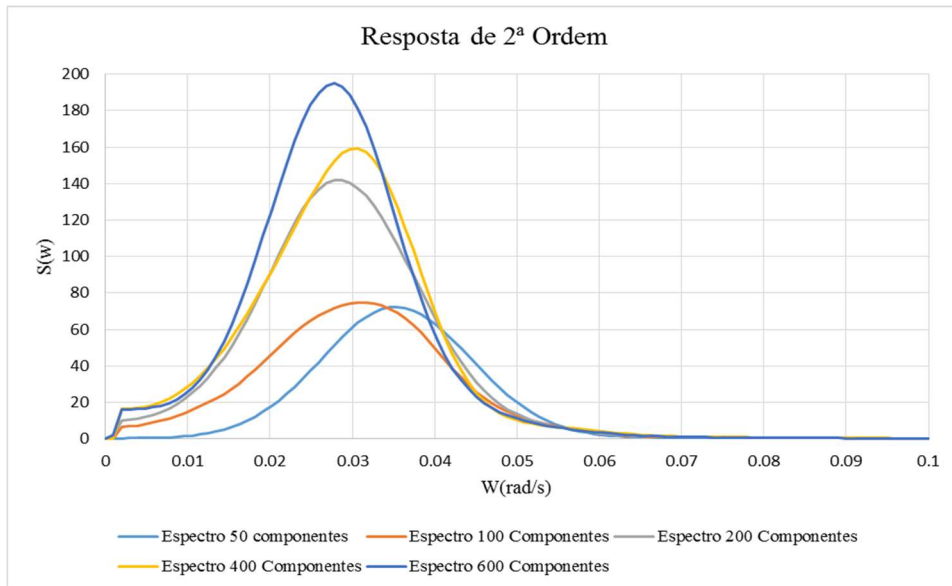


Figura 72: Resposta 2ª Ordem, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.

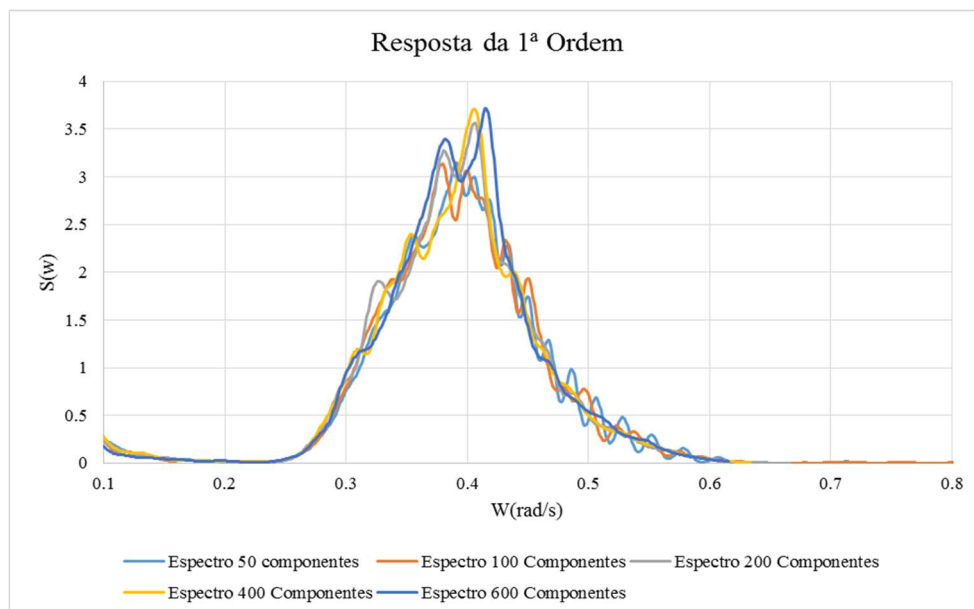


Figura 73: Resposta 1ª Ordem, Intervalo de Período Constante com Amostragem Aleatória.

Examinando a Figura 72 podemos visualizar que a partir da discretização com 200 componentes é onde começamos a obter um resultado satisfatório para a 2ª ordem.

Na Figura 73, é apresentada a resposta da primeira ordem, onde podemos ver que todos os diferentes números de componentes discretizados apresentam resultados satisfatórios, todos próximos dos 600 componentes, porém os mais próximos continuam a ser o de 200 e 400 componentes.

Os gráficos a seguir apresentam a comparação dos diferentes números de componentes com os espectros de *Heave*, *Pitch* e *Roll* para a discretização de amplitude constante.

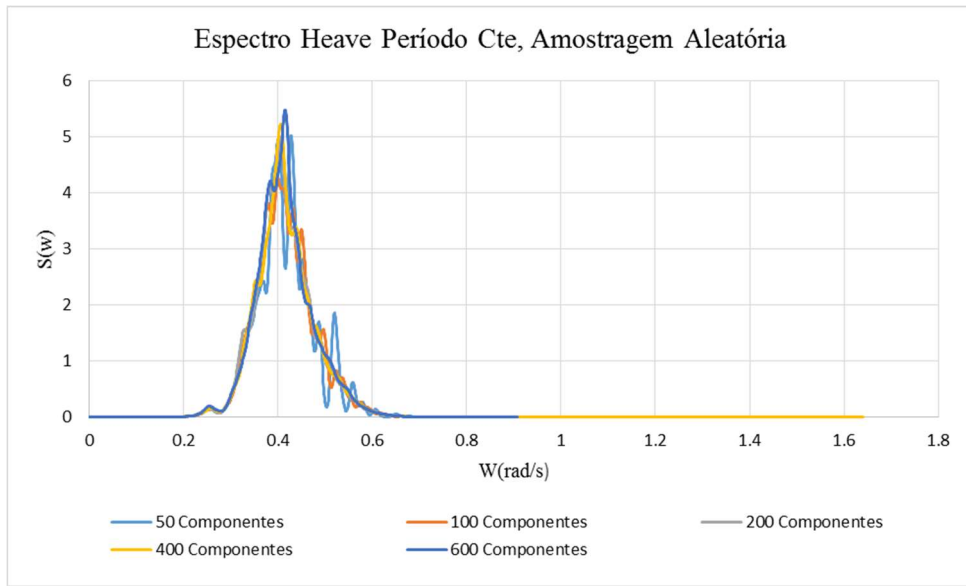


Figura 74: Espectro Heave, Período Constante Amostragem Aleatória.

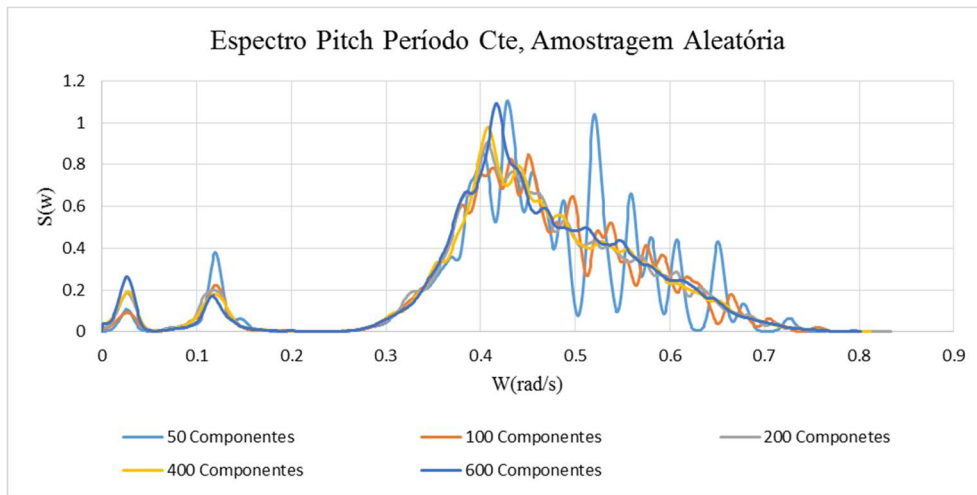


Figura 75: Espectro Pitch, Período Constante Amostragem Aleatória.

De acordo com o exposto nos gráficos, pode-se perceber que para a discretização de período constante com amostragem aleatória, a partir da configuração de 200 componentes seria recomendada para dar bons resultados da resposta de 2ª ordem, porém para a 1ª ordem todas as configurações deram resultados com uma boa precisão.

6.3 Influência do Número de Componentes de Onda por Tipo de Discretização

Nesse item será realizada uma comparação em relação ao número de componentes utilizados para cada tipo de discretização descrita no capítulo 4.6, porém diferente do item

anterior. Pois para essa análise, os gráficos foram elaborados a partir dos diferentes números de componentes, contendo todos os tipos de discretização estudado no item 4.6.

É importante ressaltar que os resultados que serão apresentados adiante são os mesmos exposto anteriormente, porém dispostos de maneira diferente.

6.3.1 50 Componentes de Onda

As Figura 76, Figura 77 e Figura 78, trazem uma comparação entre os resultados dos diferentes métodos de discretização, explicitando que nessa seção serão apresentados apenas os resultados com 50 componentes de onda, com as respectivas respostas de 1ª e 2ª ordem.

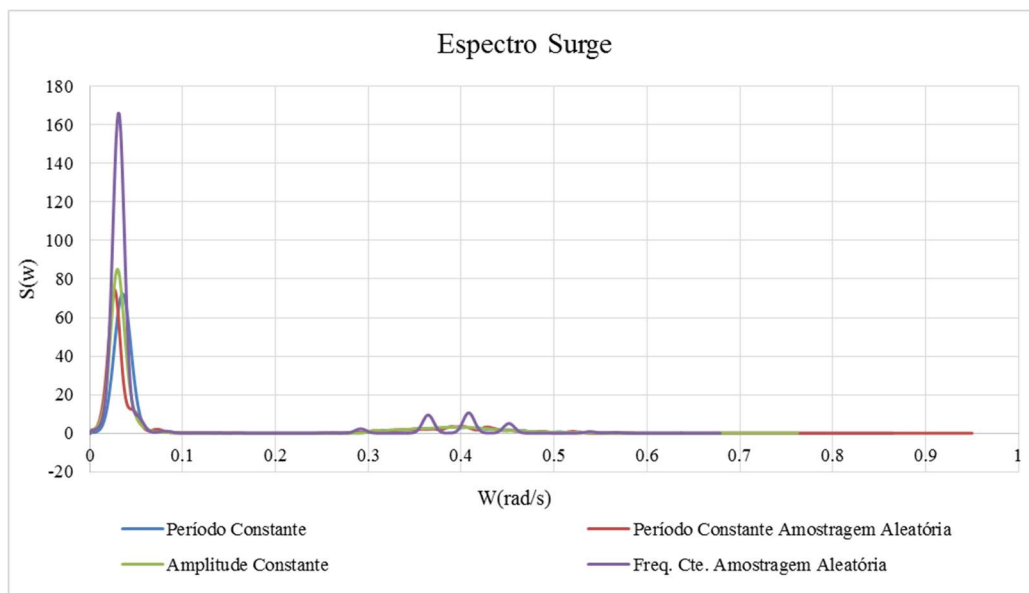


Figura 76: Espectro com 50 Componentes de Onda.

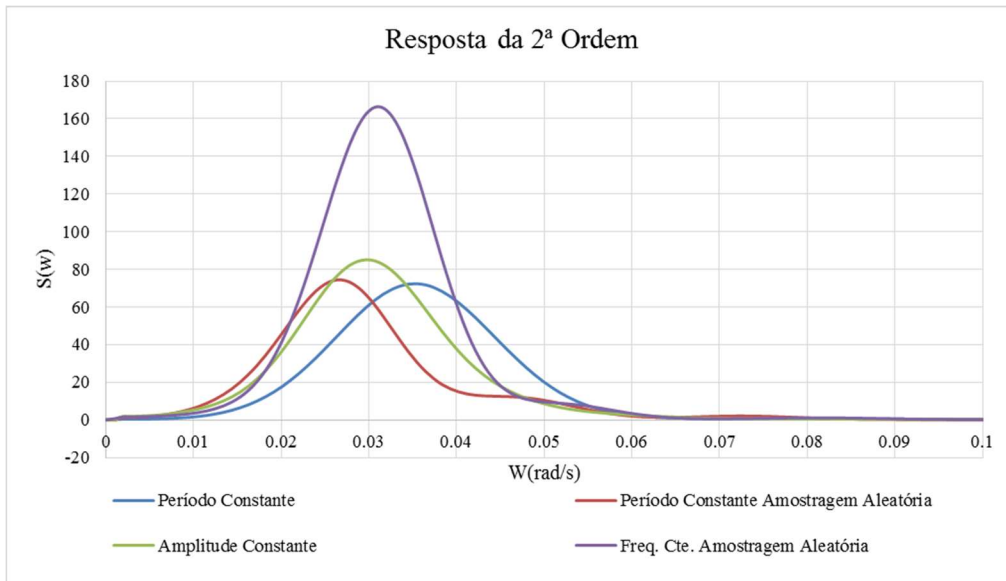


Figura 77: Resposta de 2ª Ordem, com 50 Componentes de Onda.

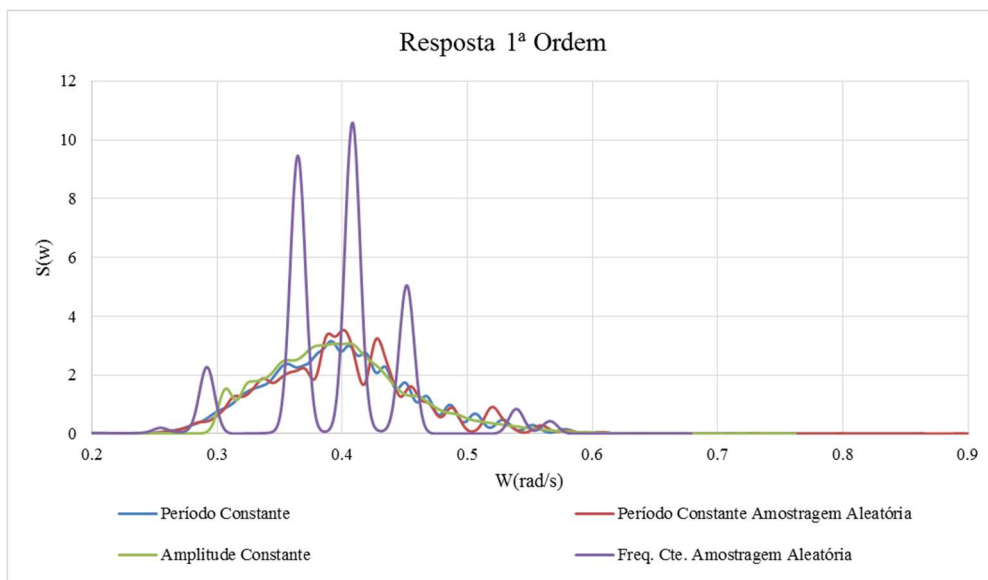


Figura 78: Resposta de 1ª Ordem, com 50 Componentes de Onda.

A partir dos gráficos acima, pode-se perceber que os únicos que apresentaram uma discretização bem diferente tanto para a resposta de 1ª ordem quanto para a de 2ª ordem são as discretizações de frequência constante e frequência constante com amostragem aleatória.

6.3.2 100 Componentes de Onda

Nas Figura 79, Figura 80 e Figura 81, se apresentam os resultados dos cinco métodos de discretização mencionados no capítulo 4, explicitando abaixo apenas os resultados com 100 componentes de onda, contendo as respostas de 1ª e 2ª ordem.

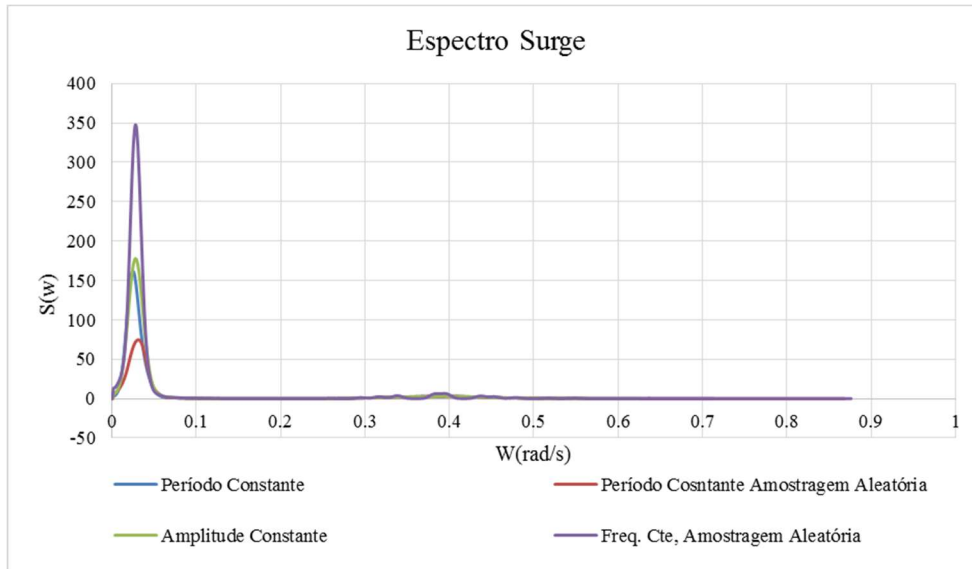


Figura 79: Espectro com 100 Componentes de Onda.

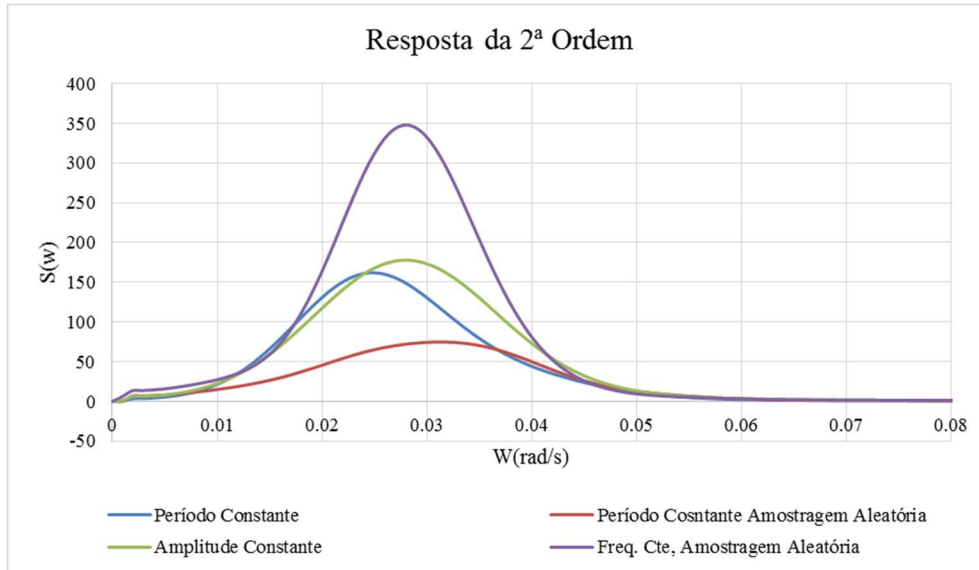


Figura 80: Resposta de 2ª Ordem, com 100 Componentes de Onda.

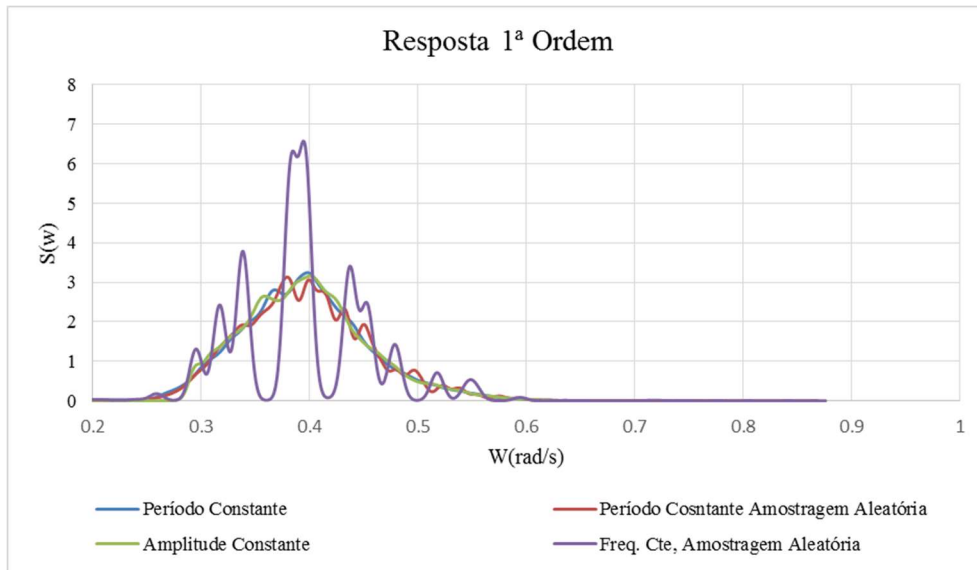


Figura 81: Resposta de 1ª Ordem, com 100 Componentes de Onda.

Os gráficos acima apresentam resultado semelhante a distribuição com 50 componentes, pois as discretizações de frequência constante e frequência constante com amostragem aleatória continuam a ser as mais diferentes.

6.3.3 200 Componentes de Onda

Nas Figura 82, Figura 83 e Figura 84, se apresentam os resultados dos diferentes métodos de discretização, explicitando abaixo apenas os resultados com 200 componentes, contendo as respostas de 1ª e 2ª ordem.

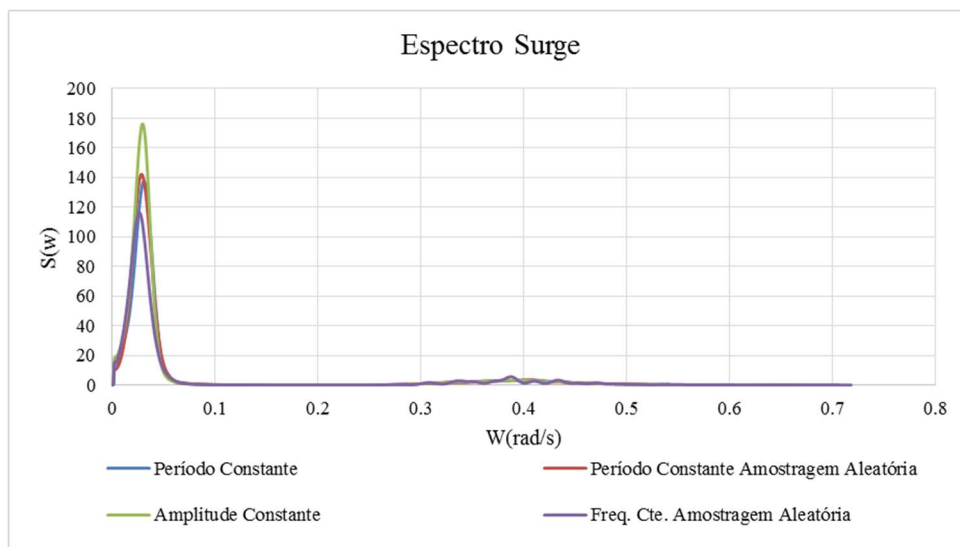


Figura 82: Espectro com 200 Componentes de Onda.

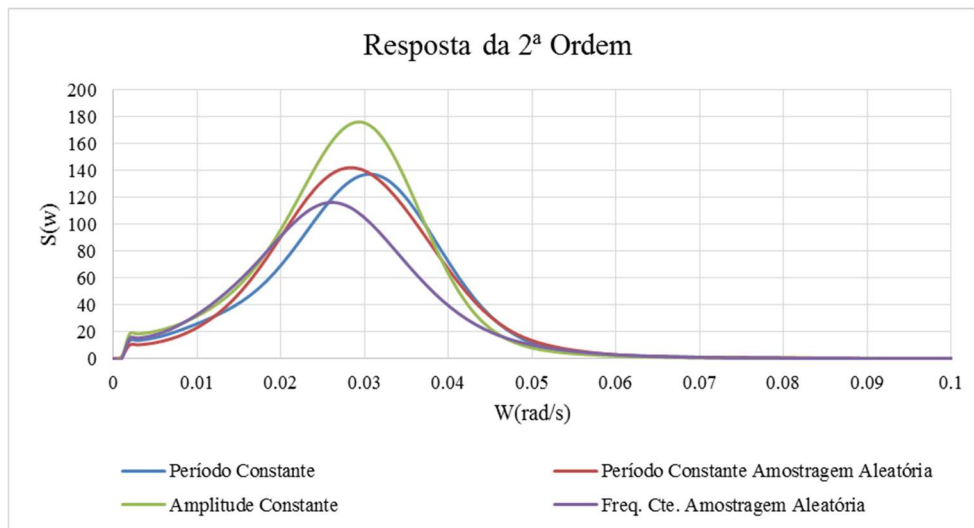


Figura 83: Resposta de 2ª Ordem, com 200 Componentes de Onda.

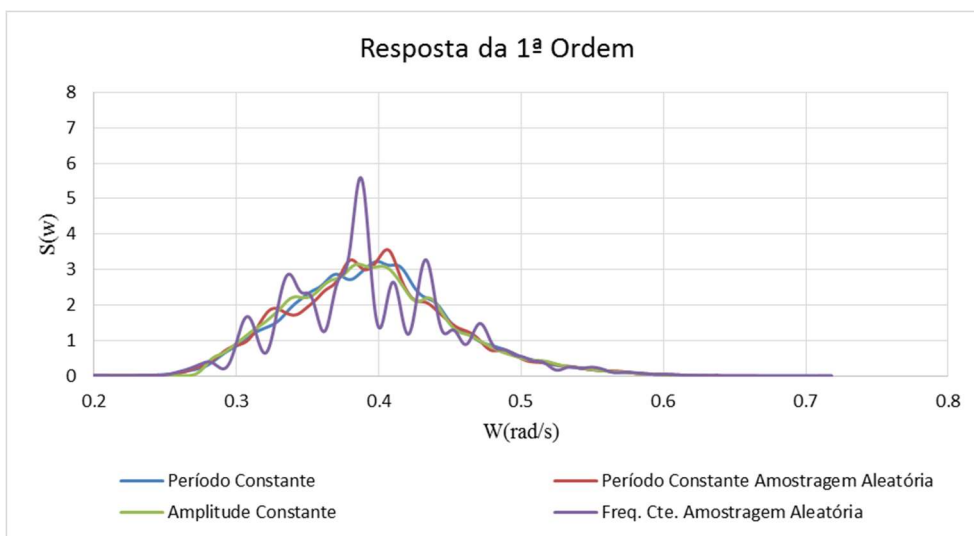


Figura 84: Resposta de 1ª Ordem, com 200 Componentes de Onda.

Na Figura 83 observa-se que para a resposta de 2ª ordem apenas a discretização de frequência constante está com um patamar de energia destoado dos demais. Porém, na resposta de 1ª ordem se repete o que ocorre na resposta de 2ª ordem e também a discretização de frequência constante com amostragem aleatória se apresenta com uma distribuição bem distinta das demais.

6.3.4 400 Componentes de Onda

Nas Figura 85, Figura 86 e Figura 87, se apresentam os resultados dos diferentes métodos de discretização que foram descritos no capítulo 4.6, explicitando abaixo apenas os resultados com 400 componentes, contendo as respostas de 1ª e 2ª ordem.

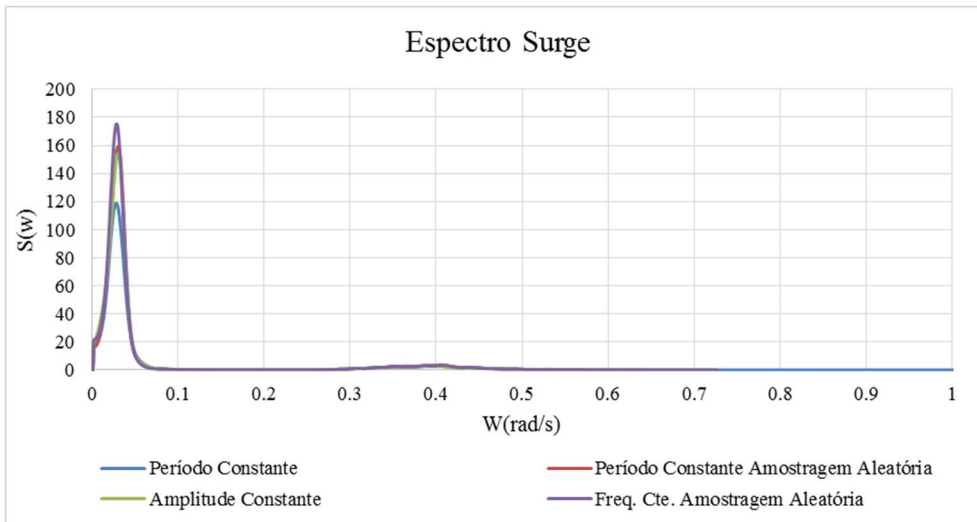


Figura 85: Espectro com 400 Componentes de Onda.

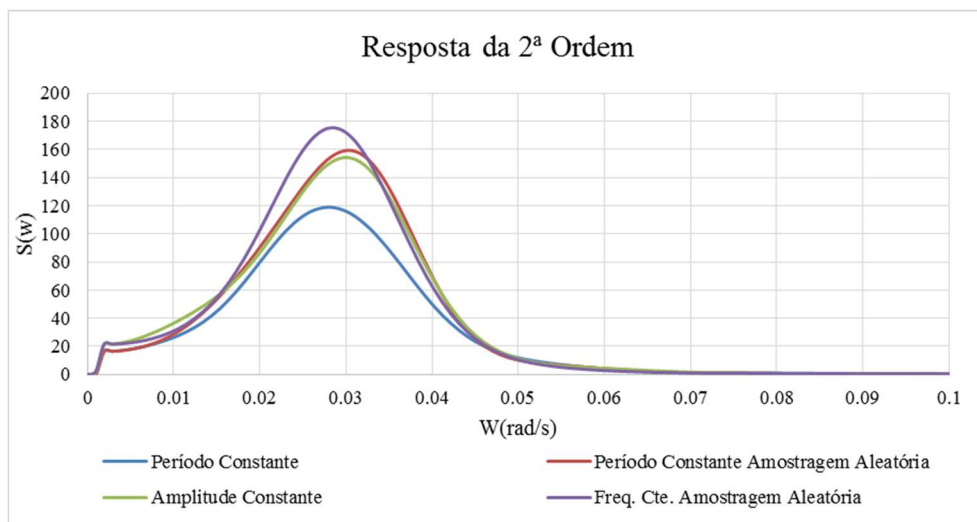


Figura 86: Resposta de 2ª Ordem, com 400 Componentes de Onda.

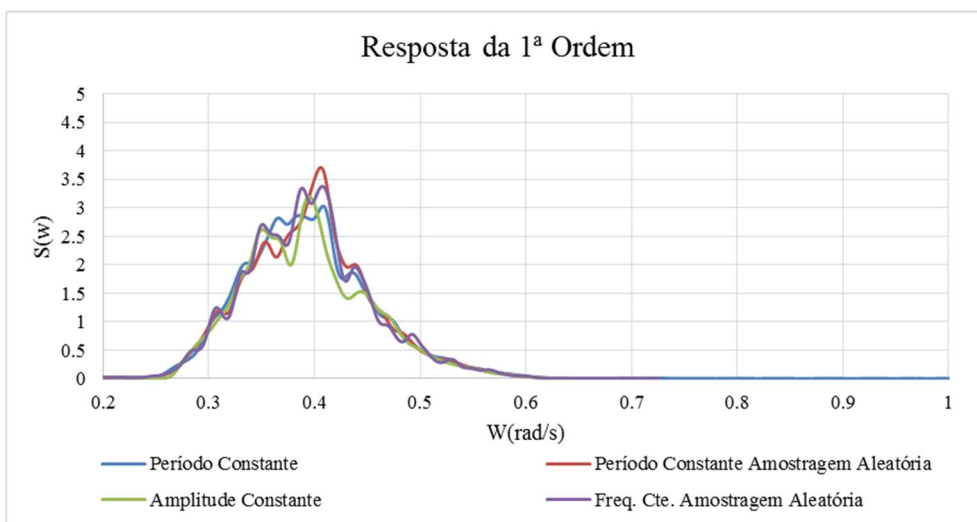


Figura 87: Resposta de 1ª Ordem, com 400 Componentes de Onda.

Na distribuição com 400 componentes pode-se observar que para as resposta de 2ª ordem existe uma grande variação entre o patamar de energia de todos os diferentes tipos de discretização. Já na resposta de 1ª ordem todos apresentam resultados muito próximos.

6.3.5 600 Componentes de Onda

Nas Figura 88, Figura 89 e Figura 90, se apresentam os resultados dos diferentes métodos de discretização que foram descritos no capítulo 4.6, explicitando abaixo apenas os resultados com 600 componentes, contendo as respostas de 1ª e 2ª ordem.

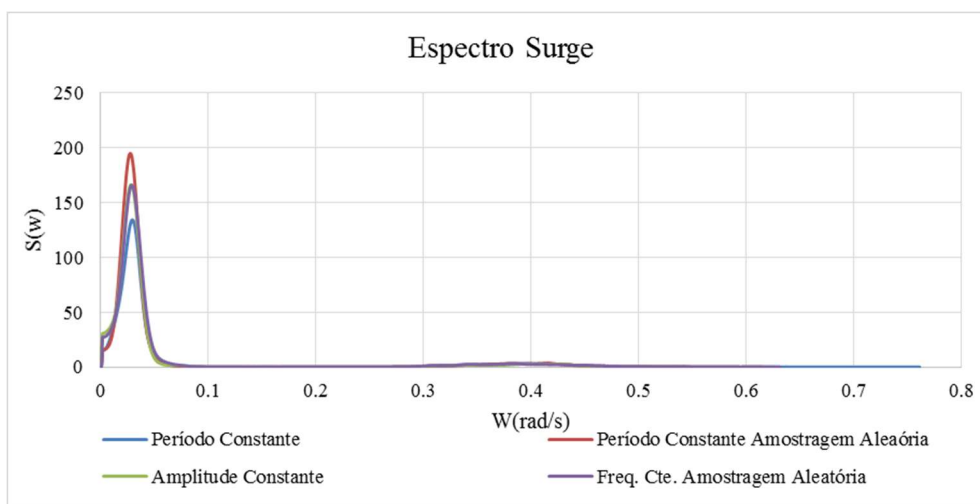


Figura 88: Espectro com 600 Componentes de Onda.

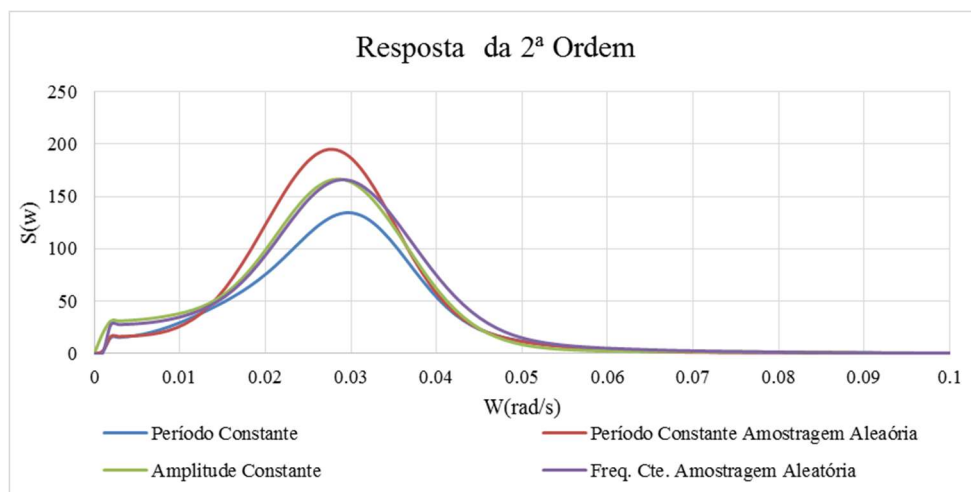


Figura 89: Resposta de 2ª Ordem, com 600 Componentes de Onda.

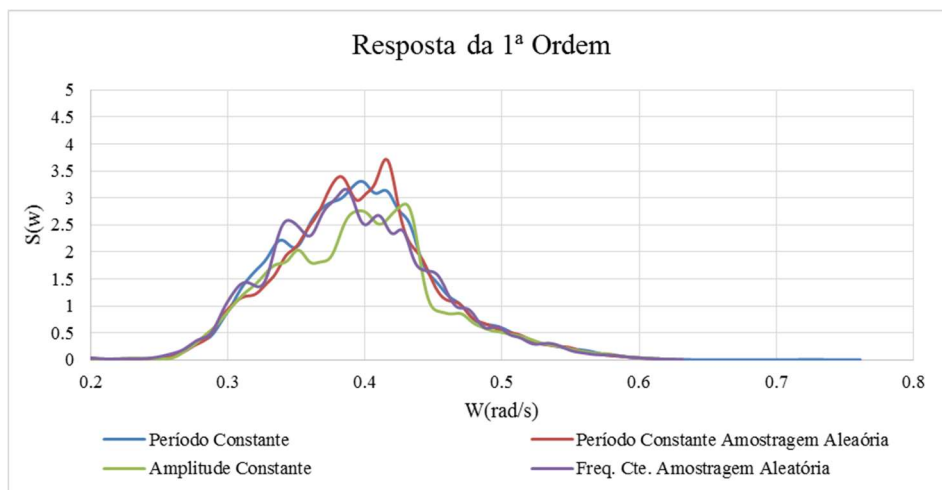


Figura 90: Resposta de 1ª Ordem, com 600 Componentes de Onda.

Na distribuição com 600 componentes pode-se observar que para as respostas de 2ª ordem existe uma variação visual entre o patamar de energia de todos os diferentes tipos de discretização. Mas na resposta de 1ª ordem todos apresentam resultados muito semelhantes.

6.4 Resultado Estatístico do Movimento

A seguir, na Tabela 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, serão apresentados alguns resultados estatísticos (média, desvio padrão, extremos de Weibull-Tail) de pós-processamento das séries temporais de movimento de 10800 segundos gerados a partir das diferentes técnicas de discretização apresentadas.

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

Para explicitar melhor a escolha das 600 componentes de onda como parâmetro nesse estudo de caso, será apresentado a seguir os gráficos de desvios padrão e médias dos resultados obtidos em surge.

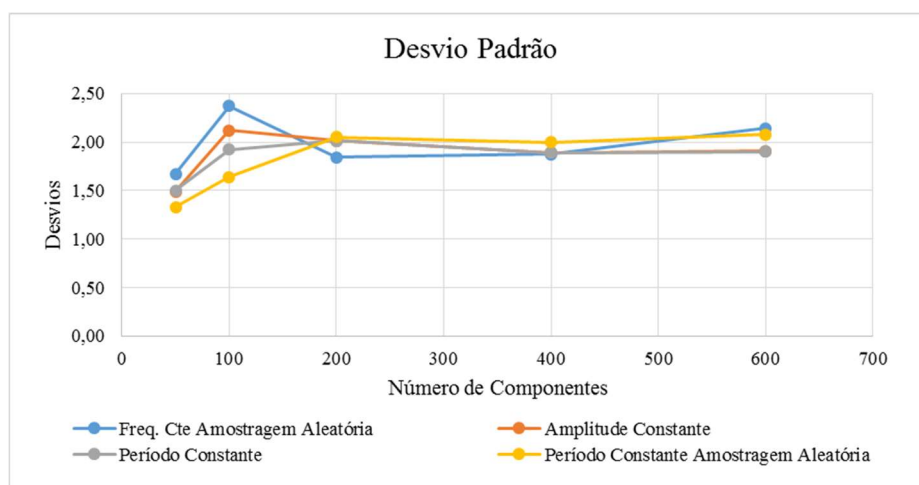


Figura 91: Desvio Padrão.

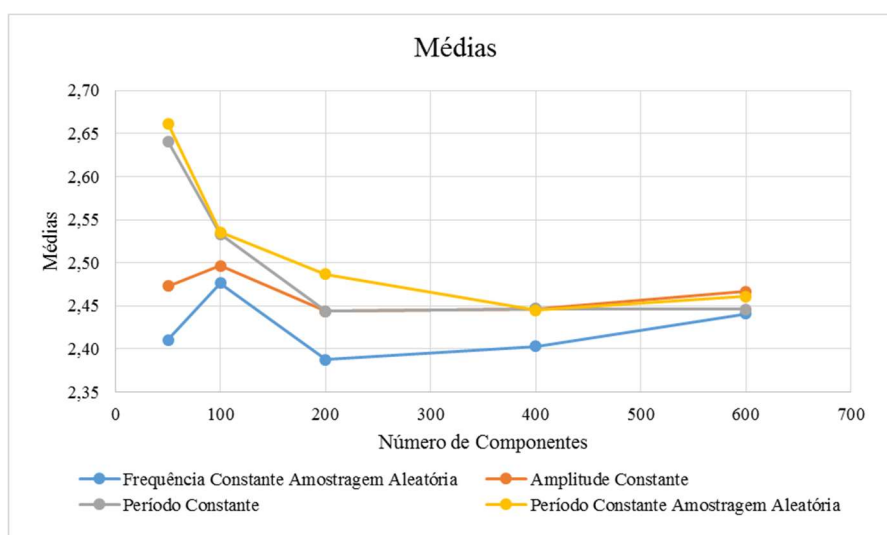


Figura 92: Médias.

Analisando as figuras acima, que apresentam os desvios padrões e as médias nos diferentes números de componentes para os tipos de discretização que estão sendo estudado, é possível verificar que com 600 componentes de onda os resultados de médias quanto os de desvios padrão convergem e por este motivo esta configuração foi escolhida como de referência.

É importante ressaltar que as diferenças visuais apresentadas na Tabela 1 não representam grandes diferenças de desvio padrão, conforme valores apresentados na Tabela 1 em números absolutos, a diferença de desvio padrão é inferior a 2 cm.

Na Tabela 2 se observam as diferenças percentuais dos resultados estatísticos, se utilizando como base para esses resultados o parâmetro de 600 componentes de onda dos espectros discretizados em surge.

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

Logo, a partir desta comparação o resultado que apresenta a maior diferença percentual em relação ao desvio padrão é o de discretização de espectro período constante com amostragem aleatória, o que também se repete quando analisamos os resultados extremos mínimos. No entanto, isso não acontece nos resultados dos extremos máximos, o que apresenta a maior diferença é frequência constante com amostragem aleatória.

Analisando os desvios de alta frequência (1ª ordem) que apresentou uma menor diferença percentual foi a discretização de período constante, e período constante com amostragem aleatória. Já para os resultados de desvios de baixa frequência (2ª ordem) o que convergiu mais rápido e obteve o melhor resultado foi o amplitude constante com 100 componentes de onda.

6.5 Resultado Estatístico da Tração

Nesta seção serão analisados os resultados de tração das linhas do modelo utilizado. Nesse modelo de quatro linhas, apenas o resultado de uma das quatro linhas foi escolhido (linha 2) para gerar os resultados de tração.

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 e também os resultados das diferenças percentuais das trações das linhas em relação ao parâmetro.

Tabela 3: Estatística da Tração das Linhas.

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	8770.03		200	-0.60	-0.18
	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

Com os resultados foi possível analisar que a discretização de frequência constante com amostragem aleatória apresenta a maior diferença em relação aos extremos máximos, mas para extremos mínimos a maior diferença percentual acontece na discretização período constante com amostragem aleatória, logo se mostrando a discretização com os piores resultados.

Porém os resultados de tração não são satisfatórios para serem utilizado nesse estudo, não é possível a partir dele se tirar conclusões de quais são as melhores configurações para cada fase de projeto.

6.6 Custo Computacional

Buscando analisar os custos computacionais referentes aos diferentes tipos de discretização foi feita uma comparação entre os tempos de processamento das simulações, apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Custos computacionais.

Componetes	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

Pode-se notar que para diferentes tipos de discretização a distribuição 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 da análise do custo computacional e considerando a qualidade dos resultados é possível observar que para a resposta de 1ª ordem, as melhores discretizações são período constante, pois apresentaram resultados precisos com apenas 100 componentes de onda, e um custo computacional menor 85,8% menor do que o parâmetro (600 componentes).

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

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 uma redução no custo computacional de 69,3% quando comparado ao parâmetro.

7 CONCLUSÃO

7.1 Conclusões do Trabalho Proposto

Esta dissertação 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.

Com os resultados obtidos das análises dos estudos de caso, é possível concluir que:

- Analisando o número de componentes utilizados, observou-se que a partir de 200 componentes, os resultados de movimento são adequados, pois se aproximaram mais dos resultados obtidos com 600 componentes.
- As discretizações por período constante e amplitude constante foram as que geraram os melhores resultados com um menor número de componentes de onda, e um menor custo computacional em relação aos valores de referência.
- Analisando os resultados para a 1ª ordem, é possível concluir que a discretização período constante seria a melhor escolha para as fases preliminares de projeto de risers, garantindo resultados precisos e com um baixo custo computacional, pois com 50 componentes de onda se obtém resultados satisfatórios.
- Porém analisando os resultados para a 2ª ordem, a discretização que corrobora com os melhores resultados é a amplitude constante, a partir de 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.

- No contexto da Metodologia Priar (projeto Integrado de Ancoragem e Riser) para se obter uma eficiência computacional no projeto, recomenda-se que na primeira fase o projeto preliminar de risers use 50 componentes com a técnica de período constante enquanto os diagramas de offsets podem ser obtidos com 100 componentes utilizando amplitude constante. Já para o projeto preliminar de ancoragem recomenda-se que utilize a discretização de amplitude constante com 100 componentes de onda. Na segunda fase onde se tem a interação entre riser e ancoragem a melhor escolha seria amplitude constante com 100 componentes.
- Como exposto anteriormente as respostas da tração nas linhas não tiveram uma influência significativa para esse tipo de plataforma, pois 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 diferenças absolutas expressivas que comprometeriam o projeto do sistema de ancoragem, por exemplo.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

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.

8 REFERÊNCIA

- [1] A. R. 2SK, Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating, American Petroleum Institute, 3 ed., 2005.
- [2] G. B. L. A. L. ELLWANGER, “Tópicos Básicos de Hidrodinâmica Aplicados a Estruturas Offshore. Notas de Aula. Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. Brasil, 2007.” Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ., Rio de Janeiro, 2007.
- [3] J. M. MORAIS, “Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore.” Ipea: Petrobras, Brasília, 2013.
- [4] L. Faria, “Petrogasnews,” 06 03 2011. [Online]. Available: <https://petrogasnews.wordpress.com/2011/03/06/tipos-de-plataformas-de-petroleo>. [Acesso em 14 03 2016].
- [5] D. A. LIMA, “Avaliação de Formulações de Análise e Metodologias de Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Offshore Considerando Aspectos do Projeto de Risers.” em Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [6] Marcos, “blogspot,” 24 02 2012. [Online]. Available: <http://offshoresalvatagem.blogspot.com.br/>. [Acesso em 15 04 2016].
- [7] C. Fucatu, “Desenvolvimento de um Simulador Dinâmico para Análise de Navios Amarrados.” em Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1998.
- [8] T. Â. G. LACERDA, “Análise de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Flutuantes.” em Projeto de Final de Curso/ Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Rio de Janeiro, 2005.
- [9] F. CORRÊA, “Aplicação de Metodologias Híbridas em Estudos Paramétricos sobre o Comportamento de Sistemas Offshore.” em Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ., Rio de Janeiro, 2003.
- [10] A. L. d. Lima, “Avaliação de Metodologias de Análise de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo Offshore,” em COPPE/UFRJ, M.Sc. Engenharia Civil., Rio de Janeiro, 2006.

- [11] R. BAHIENSE, “Implementação e Avaliação de uma Metodologia Fortemente Acoplada para Análise de Sistemas Flutuantes Offshore,” em Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil., Rio de Janeiro, 2007.
- [12] A. F. Batalha, “Análise de Fadiga de Estruturas Offshore Tipo Torside,” em Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- [13] S. K. Chakrabarti, Handbook of Offshore Engineering., Plainfield, Illinois, USA: ELSEVIER, 2005.
- [14] B. JACOB, “Programa PROSIM: Simulação Numérica do Comportamento de Sistemas para Exploração de Petróleo Offshore – Manual Teórico.,” em COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2006.
- [15] C. S. Brandão, “Geração de Estados de Mar Equivalentes para Análises Preliminares de Sistemas de Risers.,” em Dissertação de M.Sc., COPPE/ UFRJ, Programa de Engenharia Civil,, Rio de Janeiro, 2016.
- [16] F. G. T. d. Menezes., “Acoplamento Hidrodinâmico e Estrutural de Sistemas Flutuantes Multicorpos para Produção e Escoamento de Petróleo e Gás,” em Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil., Rio de Janeiro, 2013.
- [17] WAMIT, “A Radiation-Diffraction Panel Program for Wave-Body Interactions. Versão 5.3,” em Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, , Massachusetts, 1995.
- [18] F. J. B. CORRÊA, “Semi-Coupled Scheme for the Analysis of Floating Production Systems.,” em International Conference on Ocean.Offshore and Arctic Engineering (OMAE), Nantes, France, 2013.
- [19] F. N. Corrêa, “Ferramentas Computacionais para Análise Acoplada de Sistemas Offshore.,” em Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ., Rio de Janeiro, 2008.
- [20] A. R. C. GIRÓN, “Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers em Plataformas Flutuantes de Produção de Petróleo.,” em Tese (doutorado) – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2013.
- [21] S. F. SENRA, “Metodologias de Análise e Projeto Integrado de Sistemas Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore.,” em COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2004.

- [22] J. F. Bogarin, “Protótipo de Sistema Especialista para Análise do Comportamento Mecânico Local de Risers Flexíveis.” em Tese M.Sc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1990.
- [23] T. O. AMORIM, “Plataformas Offshore uma Brava Análise desde a Construção ao Descomissionamentos.” em UEZO - Projeto de Final de Curso/Tecnologia em Construção Naval, Rio de Janeiro, 2010.
- [24] W. M. L. PIERSON, “A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A.,” *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69 (24), 5181-5203., pp. 5181-5203., 1964.
- [25] J. E. Thomas, *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
- [26] L. V. S. Sagrilo., “Apostila de Confiabilidade Estrutural do Programa de Engenharia Civil.” em Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- [27] Jacob, “SITUA-PROSIM, Programa Prosim: Simulação Numérica do Comportamento de Sistemas para Exploração de Petróleo Offshore. Manual Teórico.” em LAMCSO COPPE/UFRJ., Rio de Janeiro, 2006.