



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

**ANÁLISE MODAL E CONTROLE DE
PLATAFORMAS *OFFSHORE* SUJEITAS A
PERTURBAÇÕES PERSISTENTES**

Luciano da Silva

2014



ANÁLISE MODAL E CONTROLE DE PLATAFORMAS *OFFSHORE* SUJEITAS A PERTURBAÇÕES PERSISTENTES

Luciano da Silva

Dissertação de Mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PROEE), da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Oscar A. Z. Sotomayor

São Cristóvão – SE, Brasil
Maio de 2014

ANÁLISE MODAL E CONTROLE DE PLATAFORMAS *OFFSHORE* SUJEITAS A
PERTURBAÇÕES PERSISTENTES

Luciano da Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO CORPO DOCENTE DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA (PROEE),
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Gabriel Francisco da Silva, Dr.

Prof. Leocarlos Bezerra da Silva Lima, Dr.

Prof. Oscar A. Z. Sotomayor, Dr.

SÃO CRISTÓVÃO – SE, BRASIL
MAIO DE 2014

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Silva, Luciano da
S586a Análise modal e controle de plataformas offshore sujeitas
a perturbações persistentes / Luciano da Silva; orientador
Oscar A. Z. Sotomayor. – São Cristóvão, 2014.
105 f. ; il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal de Sergipe, 2014.

1. Materiais – testes - vibração. 2. Plataformas de
perfuração - automação. 3. Controladores programáveis. I.
Sotomayor, Oscar Alberto Zanabria, orient. II. Título.

CDU 620.178.5

*...Meu canto de morte,
Guerreiros, ouvi:
Sou filho das selvas,
Nas selvas cresci;
Guerreiros, descendo
Da tribo Tupi.
Da tribo pujante,
Que agora anda errante
Por fado inconstante,
Guerreiros, nasci;
Sou bravo, sou forte,
Sou filho do Norte;
Meu canto de morte,
Guerreiros, ouvi...*

(Trecho de Os Timbiras. Poema de Gonçalves Dias)

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida, sabedoria e saúde. Aos meus pais que fizeram de tudo para eu chegar até aqui. Minha esposa e filha pela paciência e a todos os meus professores que passaram pela minha vida. E ao meu orientador Oscar pela paciência e por me ensinar uma ciência tão importante como a teoria do controle e suas aplicações.

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao PROEE/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Mestre (Me.)

ANÁLISE MODAL E CONTROLE DE PLATAFORMAS *OFFSHORE* SUJEITAS A PERTURBAÇÕES PERSISTENTES

Luciano da Silva

Maio/2014

Orientador: Oscar A. Z. Sotomayor

Programa: Engenharia Elétrica

A exploração *offshore* tem crescido muito nos últimos anos e grandes estruturas e equipamentos têm sido projetados e construídos para remover o óleo que se encontra abaixo da superfície do mar. Para plataformas *offshore* fixas tipo jaqueta é necessário analisar os problemas decorrentes da exposição dessas instalações ao ambiente hostil do oceano. Estas perturbações induzem vibrações excessivas nas estruturas, afetando o conforto e a estabilidade da instalação, e para combater essas vibrações uma ferramenta matemática foi utilizada para monitorar o estado da integridade da estrutura, a Transformada de Hilbert-Huang (HHT). O HHT foi utilizada com sucesso para a identificação de parâmetros modais, como frequência fundamental e fator de amortecimento da plataforma. Finalmente, uma técnica de controle de vibração ativa baseada no Controle Linear Quadrático (LQ) é implementada com o objetivo de reduzir os efeitos de perturbações oscilatórias indesejáveis causados por ondas e correntes marinhas.

Abstract of Dissertation presented to PROEE/UFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master (Me.)

MODAL ANALYSIS AND CONTROL OF OFFSHORE PLATFORMS SUBJECT TO
PERSISTENT DISTURBANCES

Luciano da Silva

May/2014

Advisor: Oscar A. Z. Sotomayor

Program: Electrical Engineering

The offshore exploration has grown tremendously in recent years, and large structures and equipment has been designed and built to remove the oil that lies beneath the sea surface. For fixed jacket type offshore platforms is necessary to consider the problems arising from exposure of these facilities to the hostile ocean environment. These perturbations induce excessive vibrations in the structures affecting the comfort and stability of the facility, and for to combat these vibrations a mathematical tool was used to monitor the integrity health of the structure, namely the Hilbert-Huang Transform (HHT). The HHT was used for the successfully identification of modal parameters, as fundamental frequency and damping factor of the platform. Finally, an active vibration control technique based on the Control Linear Quadratic (LQ) is implemented aiming to reduce the effects of undesirable oscillatory perturbations caused by waves and marine current.

Sumário

Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xiv
Capítulo1 – Introdução	01
1.1 A Indústria <i>Offshore</i> no Brasil.....	01
1.2 Plataformas <i>Offshore</i>	03
1.3 Motivação do Trabalho	07
1.4 Objetivo do Trabalho	10
1.4.1 Objetivo Geral.....	10
1.4.2 Objetivos Específicos.....	10
1.5 Revisão do Estado-da-Arte	11
1.5.1 Monitoramento de Integridade Estrutural de Plataformas <i>Offshore</i>	11
1.5.2 Controle Ativo de Plataformas <i>Offshore</i>	13
1.6 Escopo do Trabalho	17
Capítulo 2 – Plataformas <i>Offshore</i> Fixas Tipo Jaqueta	20
2.1 Introdução	20
2.2 Jaqueta.....	21
2.3 Elementos Estruturais de uma Jaqueta.....	23
2.4 Comportamento Estrutural de uma Jaqueta	26
2.5 Perturbações em Plataformas <i>Offshore</i>	26
2.5.1 Pressão Hidrostática e Flutuação	27
2.5.2 Temperatura	27
2.5.3 Corrosão e Organismos Marinhos.....	27
2.5.4 Correntes	28
2.5.5 Ondas	29
2.5.6 Ventos	30
Capítulo 3 – Amortecedores de Massa e Modelagem da Plataforma	32
3.1 Introdução	32

3.2 Amortecedor de Massa Ativo (AMD)	32
3.3 Amortecedor de Massa Sintonizado (TMD).....	33
3.4 Amortecedor de Massa Sintonizado Ativo (aTMD).....	34
3.5 Atuadores	35
3.6 Esquema da Aplicação da Força	35
3.7 Modelo Dinâmico de Plataforma	36
Capítulo 4 – A Transformada de Hilbert-Huang para Detecção de Anomalias em Estruturas	32
4.1 Introdução	32
4.2 Alterações de Parâmetros Modais devido a Mudança de Parâmetros Físicos da Estrutura.....	47
4.3 Monitoramento Estrutural de Plataformas	50
4.4 Métodos usuais de Análise de Dados.....	51
4.4.1 Análise Espectral de Fourier	51
4.4.2 Técnica Wavelet (Ondaleta).....	52
4.4.3 Transformada de Hilbert-Huang	52
4.5 Identificação de Parâmetros Modais usando a HHT.....	57
4.6 Aplicação em um Sistema com um Grau de Liberdade (SDOF).....	58
Capítulo 5 – Aplicações e Resultados da HHT no Modelo de Plataforma Offshore	68
5.1 Introdução	68
5.2 Determinação do Sinal de Vibração	68
5.3 Análise do 1º Modo	69
5.4 Análise do 2º Modo	76
Capítulo 6 – Controle da Plataforma Offshore Sujeita a Perturbações Persistentes	82
6.1 Introdução	82
6.2 Modelo Dinâmico da Estrutura Linear com Controle Ativo	83
6.3 Controlador Ótimo LQ.....	84
6.3.1 O problema LQ de Horizonte Finito	87
6.3.2 O problema LQ de Horizonte Infinito	90
6.4. Aplicação do Controle na Plataforma Offshore	91

Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações	97
Referências Bibliográficas	99

Lista de Figuras

1.1 Classificação das Plataformas.....	03
1.2 Alguns tipos de plataformas de petróleo <i>offshore</i> (Fonte: Petrobras)	04
1.3 Plataforma PMXL-1	07
1.4 Plataforma PRA-1.....	08
2.1 Esquema de uma plataforma fixa tipo jaqueta.....	22
2.2 Jaqueta da plataforma de Mexilhão sendo transportada até a Bacia de Campos (pedesenvolvimento.com, 2009).....	25
2.3 Elementos de uma jaqueta (Bravo, 2011).....	25
2.4 Principais perturbações em plataformas <i>offshore</i>	31
3.1 Amortecedor de massa ativo	33
3.2 Amortecedor de massa sintonizado	33
3.3 Amortecedor de massa sintonizado ativo com massa auxiliar	34
3.4 Amortecedor de massa sintonizado ativo	34
3.5 Esquema de um atuador hidráulico linear (Connor, 2002).....	36
3.6 Plataforma sujeita a forças hostis (Zribi et al., 2004)	37
3.7 Plataforma detalhada (estrutura + dispositivo TMD ativo (aTMD)).....	38
3.8 Força hidrodinâmica da onda sobre a plataforma para uma frequência de onda $\Omega = 0,5773$ Hz	44
3.9 Resposta da plataforma para uma frequência de onda $\Omega = 0,5773$ Hz	44
3.10 Força hidrodinâmica da onda sobre a plataforma para uma frequência de onda $\Omega = 1,8$ Hz	45
3.11 Resposta da plataforma para uma frequência de onda $\Omega = 1,8$ Hz	45
4.1 Oscilador bilinear (Curadelli, 2003)	49
4.2 Frequência natural instantânea versus amplitude instantânea para as três forças aplicadas no oscilador (Curadelli, 2003).....	49
4.3 Fator de amortecimento instantâneo versus amplitude instantânea para as três forças aplicadas no oscilador (Curadelli, 2003).....	50
4.4 Envoltórias no sinal (Neves, 2012).....	53
4.5 Contorno da integral (Tolwinski, 2007)	55

4.6 Sistema SDOF	58
4.7 Resposta livre do sistema SDOF	60
4.8 IMFs do sinal	61
4.9 Transformada de Hilbert de cada IMF	61
4.10 Gráfico ampliado da HHT1	62
4.11 Espectro de frequência de Fourier	63
4.12 Espectro de frequência de Fourier referente a IMF1	63
4.13 Logaritmo da amplitude versus tempo	64
4.14 Ângulo de fase versus tempo	65
4.15 Média da frequência de pico a pico	66
5.1 Deslocamento do 1° modo da plataforma <i>offshore</i> , para uma frequência de onda de $\Omega = 0,5773$ Hz	69
5.2 Espectro de Fourier	70
5.3 Sinal filtrado do 1° modo de vibração	71
5.4 IMFs do 1° modo	72
5.5 HHT para cada IMF do 1° modo	73
5.6 HHT1 do 1° modo	74
5.7 Logaritmo da amplitude para o 1° modo	75
5.8 Gráfico do ângulo de fase para o 1° modo	75
5.9 Sinal filtrado entre as frequências 8,86 Hz e 12,86 Hz do modo de vibração	76
5.10 IMFs para o 2° modo	77
5.11 HHT para o 2° modo	78
5.12 HHT1 para o 2° modo	79
5.13 Logaritmo da amplitude para o 2° modo	80
5.14 Gráfico do ângulo de fase para o 2° modo	80
6.1 Plataforma <i>offshore</i> com controle ativo	83
6.2 Sistema de controle da plataforma <i>offshore</i> no simulador	92
6.3 Resposta da plataforma com controle para uma frequência de onda de $\Omega = 0,5773$ Hz	93

6.4 A força de controle da entrada para $\Omega = 0,5773$ Hz	94
6.5 Resposta da plataforma com controle para uma frequência de onda de $\Omega = 1,8$ Hz.....	95
6.6 A força de controle da entrada para $\Omega = 1,8$ Hz	95

Lista de Tabelas

3.1 Propriedades dos tubos de aço cilíndricos (Zribi et al,2004).....	39
3.2 Dados de projeto dos membros da estrutura (Zribi et al,2004)	39
5.1 Comparação dos parâmetros	81

Capítulo 1

Introdução

1.1 A Indústria *Offshore* no Brasil

A indústria *offshore* mundial teve seu nascimento entre os anos 1930 e 1950 na Venezuela e no Golfo do México, respectivamente. Desde o início dos anos 50, as companhias norte-americanas de petróleo que atuavam no Golfo do México desenvolviam tecnologia para exploração *offshore*. A partir de então, a exploração começou a se expandir para o Mar do Norte que, a partir da década de 70, passou a rivalizar com o Golfo do México em ordem de importância para o volume de investimentos, formando os primeiros grupos de empresas na segmentação *offshore*, entre elas a Shell Oil, ExxonMobil, Texaco e AGIP (Neto e Costa, 2007).

A extensão das tecnologias no Golfo do México, nas décadas de 50 e 60, para o Mar do Norte demandaram importantes aprimoramentos: as profundidades excediam os 100 metros de lâmina d'água e as estruturas que tiveram que ser fabricadas eram de gigantescas dimensões. Foram fabricadas para enfrentar condições climáticas extremamente adversas tais como ondas que podiam chegar a alcançar 30 metros de altura (Furtado, 1998).

No Brasil, a exploração *offshore* de petróleo teve seu crescimento a partir da década de 70, quando foram encontrados na Bacia de Campos grandes reservas do hidrocarboneto. Com o Programa de Capacitação Tecnológica em Águas Profundas (PROCAP) da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), criado em 1986, foram desenvolvidas tecnologias capazes de extrair petróleo a 400 metros de profundidade. Na época, isso significou um grande desafio para os pesquisadores que haviam desenvolvido equipamentos e processos para extração em profundidade média de 150 metros. Outras versões do programa, como o PROCAP 2000, que durou de 1993 a 1999, prospectou petróleo em bacias a 2000 metros de profundidade em 20 projetos orçados em aproximadamente US\$ 750 milhões, sendo que 80% deles eram para inovação e o restante para extensão dos projetos existentes.

A maior descoberta durante o PROCAP 2000 foi o Campo de Roncador, na Bacia de Campos, a 1853 metros de profundidade. O único problema é que a Petrobras ainda não havia desenvolvido equipamentos capazes de explorar petróleo em águas tão profundas. Foram aplicadas diversas tecnologias inéditas nesse projeto, além do reaproveitamento da Plataforma 36 (P-36), que estava em um campo de menor profundidade, o de Marlim, e prospectava petróleo mais pesado.

O bom resultado da adaptação da P-36 levou a Petrobras a conquistar o título de liderança e referência tecnológica mundial em extração de petróleo *offshore*. O reconhecimento do feito em 1991, com o prêmio *OTC Distinguished Achievement Award*, oferecido na *Offshore Technology Conference*, nos Estados Unidos. No ano seguinte, a empresa recebeu novamente o prêmio e foi reconhecida como a instituição que mais contribuiu para o desenvolvimento da indústria *offshore*.

O PROCAP 3000 (Programa Tecnológico em Sistemas de Exploração em Águas Ultraprofundas), que durou de 2000 a 2004, visou a produção de petróleo a 3000 metros de profundidade, levando o Brasil para o patamar de país autossuficiente em tecnologia *offshore* (Goeking, 2010). Atualmente, segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP), a produção dos poços submarinos corresponde a mais de 90% da produção total de petróleo no Brasil.

Com a descoberta recente de grandes reservas de gás natural e petróleo na província do Pré-Sal, os limites de exploração serão expandidos a uma profundidade de aproximadamente 7 km da linha de água. Para acompanhar todo esse crescimento, tendo em vista os volumes de produção envolvidos e o porte das instalações que se fazem necessárias, a estrutura *offshore* da Petrobras deverá aumentar. Serão dezenas de novas plataformas de petróleo em conjunto com grandes investimentos no setor de pesquisa e tecnologia por conta da complexidade dessas operações. As adversidades encontradas no local são de um conhecimento um tanto quanto escasso se comparado à exploração em regiões menos profundas. A superação desses desafios está fortemente ligada a um esforço coletivo e multitarefa envolvendo diversos setores da sociedade acadêmica e desenvolvedora de tecnologia.

1.2 Plataformas *Offshore*

Plataformas de petróleo *offshore* são maravilhas da engenharia. São grandes estruturas utilizadas no mar projetadas para abrigar operadores e máquinas necessárias para as operações de exploração, perfuração, produção, tratamento de água e gás para reinjeção, acomodações etc. No mundo existem mais de 9000 destas instalações (Harish et al., 2010).

Dependendo das circunstâncias, a plataforma pode ser fixada ao fundo do oceano, consistir de uma instalação flutuante ou uma mistura de ambos. Uma classificação dos tipos de plataformas *offshore* existentes é mostrada no esquema a seguir. A classificação depende da finalidade da unidade e da profundidade da lâmina de água do local de operação, a Figura 1.1 ilustra através de um do diagrama a classificação.

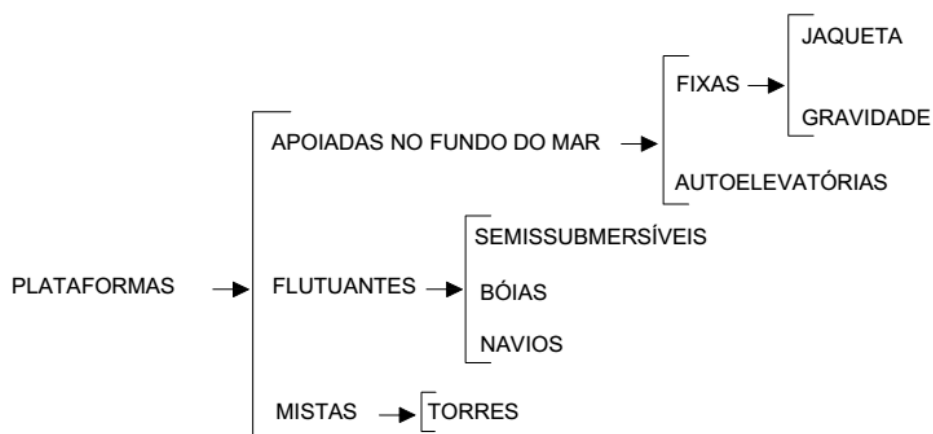


Figura 1.1 – Classificação das plataformas

A Figura 1.2 ilustra alguns dos tipos tradicionais de plataformas *offshore* em uso no mundo. Nessa figura, aparecem da esquerda para a direita: plataforma fixa por gravidade, plataforma fixa tipo jaqueta, plataforma semissubmersível e navio plataforma. Uma descrição mais concisa de cada um dos tipos de plataformas pode ser vista em Oliveira et al. (2011).

O desenvolvimento da produção *offshore* fez-se, em grande medida, a partir de plataformas fixas. Em 1947, a *Superior Oil Company* (agora parte da ExxonMobil Corporation) erguia a primeira plataforma fixa de perfuração/produção a 6,1 metros de lâmina d'água e a aproximadamente 30 quilômetros de Vermilion Parish, Luisiana. A plataforma era uma estrutura metálica construída com o conceito de jaqueta.



Figura 1.2 – Alguns tipos de plataformas de petróleo *offshore* (Fonte: Petrobras)

O conceito de jaqueta surgiu a partir da fabricação, em canteiro, de uma estrutura de travejamento que fosse colocada no local de instalação por guindaste e que servisse inicialmente de guia para cravação de estacas e, posteriormente, travejamento 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 maiores ou consideradas mais profundas na época (Lima et al., 2002).

Até uma lâmina d'água de 30 metros a instalação de uma plataforma fixa de petróleo era feita basicamente com o auxílio de guindastes em todas as fases. Em 1955, a Shell iniciou a instalação em lâminas d'água superiores a 30 metros, ocasionando o surgimento de um problema, que consistia no peso e nas dimensões da jaqueta a ser içada. Em 1957 foi construída a primeira barça de lançamento, permitindo, assim, a evolução para lâminas d'água maiores.

Posteriormente, essas estruturas foram instaladas no Golfo do México, em águas de até 60 metros de profundidade. A extensão das tecnologias, nas décadas de 50 e 60, para o Mar do Norte demandou importantes aprimoramentos: as profundidades excediam 100 metros de lâmina d'água e as estruturas que tiveram que ser fabricadas

eram de gigantescas dimensões. Foram fabricadas para enfrentar condições climáticas extremamente adversas, tais como ondas que podiam chegar a alcançar 30 metros de altura (Furtado, 1998).

Dentre as plataformas em operação no mundo, as plataformas fixas de aço que possuem as jaquetas de maior porte já instaladas, em profundidades superiores a 300 metros, situam-se no Golfo do México e Sul da Califórnia. A plataforma fixa mais profunda do mundo foi instalada pela Shell em 1988, no Golfo do México, a uma profundidade de 412 metros, o que constituiu uma proeza da engenharia pela dimensão da estrutura da jaqueta (Menezes, 1997).

No Brasil, a produção *offshore* iniciou-se através de uma plataforma fixa, instalada em uma lâmina d'água de cerca de 30 metros, no complexo de Guaricema, em Sergipe, em 1968. Nos anos seguintes, com os novos descobrimentos no litoral do Nordeste, tanto em Sergipe como no Rio Grande do Norte, foram instaladas plataformas fixas com características do tipo padrão de quatro pernas, convés duplo e guias para até seis poços. Em 1975, além das plataformas de aço convencionais, decidiu-se pela utilização de plataforma por gravidade de concreto para o desenvolvimento de campos no Rio Grande do Norte. Até 1983, as atividades *offshore* no Brasil somavam 40 plataformas fixas, dentre elas 4 no Ceará, 8 no Rio Grande do Norte, 16 em Sergipe, 8 na Bahia, 3 no Rio de Janeiro e 1 no Espírito Santo.

A partir de 1984, com o começo da exploração em águas profundas na Bacia de Campos, que na época variavam de 300 a mais de 1000 metros de lâmina d'água, e a confirmação do potencial nessa área, criou-se a necessidade do desenvolvimento tecnológico para substituir a plataforma fixa, que devido a suas limitações técnicas e econômicas impossibilitavam seu uso em águas profundas. Diante disto, segue-se a evolução das plataformas flutuantes.

Atualmente, além das estruturas fixas, tipo jaqueta e por gravidade, a Petrobras utiliza diversos tipos de plataformas nas suas operações *offshore*. Entre estas temos:

- **Plataformas autoelevatórias.** São constituídas basicamente de uma balsa equipada com estrutura de apoio, ou pernas, que, acionadas mecânica ou hidráulicamente, movimentam-se para baixo até atingirem o fundo do mar. Em seguida, inicia-se a elevação da plataforma acima do nível da água, a uma altura

segura e fora da ação das ondas. Essas plataformas são móveis, sendo transportadas por rebocadores ou por propulsão própria. Destinam-se à perfuração de poços exploratórios na plataforma continental, em lâminas d'água que variam de 5 a 150 metros.

- **Plataformas Semissubmersíveis.** São compostas de uma estrutura de um ou mais conveses, apoiada em flutuadores submersos. Dois tipos de sistema são responsáveis pelo posicionamento da unidade flutuante: o sistema de ancoragem e o sistema de posicionamento dinâmico. O sistema de ancoragem é constituído de 8 a 12 âncoras e cabos e/ou correntes, atuando como molas que produzem esforços capazes de restaurar a posição do flutuante quando é modificada pela ação das ondas, ventos e correntes. No sistema de posicionamento dinâmico, não existe ligação física da plataforma com o fundo do mar, exceto a dos equipamentos de perfuração. Sensores acústicos determinam a deriva, e propulsores no casco acionados por computador restauram a posição da plataforma. As plataformas semissubmersíveis apresentam grande mobilidade, sendo as preferidas para a perfuração de poços exploratórios.
- **Navios-sonda.** É um navio projetado para a perfuração de poços submarinos. Sua torre de perfuração localiza-se no centro do navio, onde uma abertura no casco permite a passagem da coluna de perfuração. O sistema de posicionamento do navio-sonda, composto por sensores acústicos, propulsores e computadores, anula os efeitos do vento, ondas e correntes que tendem a deslocar o navio de sua posição.
- **Plataformas tipo FPSO.** Os FPSOs (Floating, Production, Storage and Offloading) são navios com capacidade para processar, armazenar e prover a transferência do petróleo e/ou gás natural. No convés do navio, é instalada uma planta de processo para separar e tratar os fluidos produzidos pelos poços. Depois de separado da água e do gás, o petróleo é armazenado nos tanques do próprio navio, sendo transferido para um navio aliviador de tempos em tempos. As plataformas FPSO são das mais utilizadas hoje, e as que comandarão a produção na área do Pré-Sal. Indicadas para produção em águas profundas e ultra profundas, as FPSO, apesar de serem navios, não têm propulsão própria, tendo que ser rebocada até o local de operação. As maiores FPSO têm capacidade de processo de petróleo em torno de 200 mil barris/dia, com produção associada de gás de aproximadamente 2 milhões de m³ por dia.

1.3 Motivação do Trabalho

Apesar da recente tendência ao uso de sistemas flutuantes na exploração *offshore* de petróleo associados a lâminas d'água profundas¹ e ultra profundas, a Petrobras e demais empresas de petróleo e gás no mundo, como *Devron*, *Shell*, *British Petroleum*, *ExxonMobil*, *Pemex*, *Saudi Aramco*, continuam operando e projetando plataformas fixas baseadas em estruturas reticuladas, as jaquetas, em profundidades de aproximadamente 200 metros (Menezes, 2007).

As plataformas fixas em operação no Brasil concentram-se nos campos de exploração da Petrobras, principalmente na região da Bacia de Campos. Além disso, há uma grande concentração de jaquetas instaladas na região Nordeste, na Bacia Potiguar (RN) e Bacia do Ceará, somando 31 plataformas fixas em profundidades aproximadas de 4 a 45 metros de lâmina d'água. Na Bacia Sergipe-Alagoas, há mais de 20 plataformas fixas instaladas nos campos de Caioba, Camorim, Dourado, Guaricema e Robalo, em profundidades de aproximadamente 30 metros.

Embora a maioria dessas plataformas tenha sido instalada na década de 80, empreendimentos recentes da Petrobras, como o Plano de Antecipação da Produção de Gás (Plangás), levou à instalação da plataforma fixa PMXL-1, mostrada na Figura 1.3, no Campo de Mexilhão, na Bacia de Santos, destinada a produzir 15 milhões de m³ de gás natural e 3.200 m³ de condensado por dia.



Figura 1.3 – Plataforma PMXL-1 (Fonte: Petrobras)

¹ No Brasil, consideradas acima de 400 metros de profundidade.

O projeto da PMXL-1 inclui uma jaqueta tronco-piramidal, de quatro pernas e oito estacas de fundação, com 182 metros de altura, a mais alta de América Latina, instalada em uma profundidade de 172 metros de lâmina d'água. O Plangás considera também a instalação de plataformas fixas tipo jaquetas para o desenvolvimento dos campos de Peroá, na Bacia do Espírito Santo, e Manati, na Bacia de Camamu (Menezes, 2007).

Outro empreendimento *offshore* recente da Petrobras é o Plano Diretor de Escoamento e Tratamento de Óleo (PDET), que considerou a instalação da plataforma de rebombeio autônoma PRA-1, mostrada na Figura 1.4, a primeira plataforma do gênero no Brasil, com capacidade de escoar 815 mil barris/dia, aprox. 50% da produção da Bacia de Campos. A PRA-1 recolhe o petróleo extraído por cinco plataformas flutuantes em água profundas (de 1.200 a 1.800 m) nos campos de Roncador, Marlim Sul e Marlim Leste e o bombeia para reservatórios em terra ou para tanques de embarcações do sistema flutuante de armazenamento e distribuição fundeados nas imediações. A PRA-1 é uma plataforma tipo jaqueta com 117 metros de altura, com 14 estacas de fundação, instalada em lâmina d'água de 106 metros, a 115 km da costa fluminense (Menezes, 2007).



Figura 1.4 – Plataforma PRA-1 (Fonte: Petrobras)

Além dos investimentos da Petrobras, tem-se concretizado o investimento da iniciativa privada na prospecção e instalação de sistemas de produção em campos economicamente rentáveis de menor interesse para a Petrobras, localizados em lâminas d'água onde se impõe a utilização de jaquetas em suas plataformas de produção (Bravo, 2011).

Diante dessa realidade, que contempla a utilização de plataformas *offshore* fixas tipo jaqueta, é necessário levar em consideração os problemas decorrentes da exposição dessas instalações ao ambiente oceânico hostil. Além da gravidade e da própria carga operacional, elas estão continuamente sujeitas a perturbações ou carregamentos dinâmicos oscilatórios, principalmente vento, ondas e correntes marinhas, e ainda de outras como marés, terremotos etc (Ma et al., 2006; Han, 2008). Estas perturbações induzem a excessivas vibrações nas estruturas, afetando o conforto e a estabilidade das instalações. Porém, o efeito mais prejudicial destas vibrações, e das tensões resultantes da ação repetitiva das perturbações que as provocam, é a fadiga metálica da estrutura, trazendo consigo um alto risco de falha e possível colapso da plataforma (Sisquini, 2001; Silva e Mainier, 2008).

Para garantir a segurança da plataforma, a velocidade e o deslocamento horizontal das estruturas devido às vibrações precisam ser limitados. Ainda mais, para oferecer estabilidade e conforto das instalações, a aceleração também precisa ser restringida (Ma et al., 2006; Han, 2008). Para isto, faz-se necessário o uso de ferramentas para monitoramento da integridade da estrutura, assim como técnicas de controle ativo de vibrações visando eliminar ou minimizar a influência de perturbações dinâmicas persistentes em plataformas *offshore* fixas tipo jaqueta.

1.4 Objetivos do Trabalho

1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de monitoramento da integridade estrutural de uma plataforma de petróleo *offshore* fixa tipo jaqueta, visando a detecção de danos, análise de fadiga e gerenciamento baseado em riscos, e implementar um sistema de controle ativo para eliminar ou minimizar as vibrações decorrentes dos carregamentos dinâmicos ambientais que afetam constantemente essas plataformas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- ✓ Modelagem a parâmetros concentrados de plataformas de petróleo fixas *offshore* tipo jaqueta;
- ✓ Simulação e análise das principais forças hostis que afetam uma estrutura *offshore* tipo jaqueta, tais como ondas e correntes marítimas;
- ✓ Identificação dos parâmetros modais de uma estrutura *offshore* tipo jaqueta usando técnicas de resposta em frequência, tais como a Transformada de Hilbert-Huang (HHT);
- ✓ Aplicação de técnicas de controle ativo para mitigação de vibrações de uma plataforma *offshore* tipo jaqueta sujeita a perturbações dinâmicas persistentes;
- ✓ Preservar o grau de operabilidade e aumentar a vida útil de plataformas *offshore* tipo jaqueta;
- ✓ Contribuir no desenvolvimento de técnicas de controle e automação em plataformas *offshore*.

1.5 Revisão do Estado-da-Arte

Existem poucos trabalhos reportados na literatura sobre monitoramento da integridade estrutural e controle ativo de plataformas *offshore*, sendo a maioria deles aplicados em estruturas fixas tipo jaqueta. Alguns desses trabalhos serão resumidos a seguir.

1.5.1 Monitoramento da Integridade Estrutural de Plataformas *Offshore*

Brincker et al. (1995) analisaram a integridade estrutural de uma plataforma *offshore*, localizada no Lago Maracaibo, na Venezuela, sujeita a vibrações contínuas causadas por carregamentos de correntes e ondas marítimas. Um esquema de detecção de danos foi desenvolvido utilizando modelos auto regressivos de médias móveis (ARMA) identificados com dados de aceleração da plataforma. O uso de modelos ARMA tem se tornado uma técnica comum para identificação de sistemas estruturais, sendo a sua principal vantagem a exatidão na extração de informações a partir de sinais ruidosos. No trabalho, a probabilidade de mudança negativa nas duas primeiras frequências naturais é proposta como indicador de dano. Baseado nesse indicador, os autores concluem que a plataforma sofreu pequenas mudanças estruturais no primeiro ano de operação, propondo futuros estudos da influência dessas mudanças na segurança estrutural da plataforma.

Brincker et al. (1996) usaram a mesma estrutura física de Brincker et al. (1995) para avaliar dois esquemas diferentes de identificação de modelos ARMA na análise modal de plataformas *offshore*. No primeiro esquema, um modelo ARMA escalar foi usado para estimar os polos (frequências naturais e fatores de amortecimento), tendo sido as formas modais então encontradas ajustando uma forma analítica para a estimativa empírica das funções de covariância. No segundo esquema, um modelo ARMA vetorial (ARMAV) foi usado, tendo sido os polos e as formas modais estimados solucionando um problema de autovalores. Ambos os esquemas forneceram boas estimativas dos parâmetros modais, tendo sido o modelo ARMAV melhor em detectar modos com espaçamentos curtos.

Liu et al. (2009) aplicaram a Transformada de Hilbert-Huang (HHT) em conjunto com um sinal mascarado para a identificação dos parâmetros modais de estruturas com modos de vibração com espaçamentos curtos. O sinal mascarado foi construído a partir de informações de frequência do sinal original, para diferenciar os dados de dois ou mais modos de frequência que se encontraram perto um do outro. No trabalho, a aplicação foi realizada no modelo de um sistema de dois graus de liberdade (2DOF) e no modelo físico de uma plataforma *offshore*, com modos de vibração curtamente espaçados. Os resultados obtidos, quando comparados com a transformada rápida de Fourier (FFT) e o método ARMA escalar, mostraram a eficiência da

metodologia proposta, revelando-se uma ferramenta muito promissora para identificação de sistemas de estruturas de plataformas *offshore*.

Li et al. (2010) e Hu et al. (2011) propuseram o método de Prony para identificação dos parâmetros modais de uma plataforma *offshore* tipo jaqueta a partir da medição de dados de vibração livre. Em comparação com a análise de Fourier para a decomposição de um sinal periódico, o método de Prony envolveu a decomposição de um sinal transiente em um número de componentes senoidais amortecidos. A aplicação foi realizada no modelo de elementos finitos de uma plataforma real, do qual foram coletados os dados de vibração livre correspondentes a dois diferentes padrões iniciais de deslocamento. Usando os sinais de aceleração da resposta amostrados, associados a cada padrão de deslocamento inicial, os parâmetros modais, tais como frequência natural e fator de amortecimento, dos diferentes modos da estrutura foram determinados com precisão. O estudo demonstrou que os parâmetros modais dos primeiros nove modos da plataforma, incluindo seis modos de translação e três de torção, puderam ser estimados usando o método proposto.

Wang et al. (2012) observaram vibrações excessivas em uma plataforma *offshore* instalada na Baía de Bohai, na China, sob condições ambientais moderadas. Os sinais de vibração foram coletados em testes conduzidos para medir a resposta de aceleração da plataforma. O modo de decomposição empírico (EMD) foi aplicado nos sinais de vibração com o objetivo de obter as funções de modo intrínseco (IMF), para logo usar a HHT para calcular a distribuição tempo-frequência dos sinais gerados. A análise revelou que a plataforma apresentava várias frequências fundamentais variantes, fato prejudicial para a integridade estrutural da plataforma. Os resultados também mostraram que o método EMD-HHT era capaz de encontrar a característica não-estacionária de sinais, a partir de medições de campo, fornecendo uma ferramenta útil para avaliação de desempenho estrutural sob condições ambientais reais.

Li et al. (2012) usaram dados de aceleração ruidosos, coletados a partir do teste de relaxamento ao degrau de uma plataforma *offshore* tipo jaqueta, para estimar suas frequências e fatores de amortecimento modais utilizando o método de Prony estendido. Este método incluía um procedimento de remoção de ruído para gerar sinais filtrados, antes de implementar o método clássico de Prony. A proposta foi primeiramente apurada usando dados gerados de um modelo de elementos finitos da plataforma de

teste, sendo os parâmetros modais estimados com muita exatidão, o que mostrou uma melhoria significativa usando dados filtrados ao invés de dados crus. Em seguida, a metodologia proposta é aplicada em dados reais obtidos de acelerômetros instalados em três locais diferentes da plataforma de testes, encontrando que os parâmetros modais estimados a partir dos sinais filtrados dos três locais separadamente apresentaram excelente concordância entre eles.

Liu et al. (2012) estudaram o desempenho de quatro métodos para identificação dos parâmetros modais de estruturas que apresentaram o problema de mistura de modos de vibração. Os métodos foram: HHT com verificação de intermitência, HHT com filtro de Fourier, HHT com sinal mascarado e HHT com sinal mascarado melhorado. A aplicação foi realizada no sinal de resposta ao impulso de um sistema de 2-DOF com modos de vibração com espaçamentos curtos e nos sinais de resposta dinâmica do modelo de elementos finitos de uma plataforma *offshore*. Os resultados obtidos mostraram que os parâmetros modais identificados pelos métodos HHT com filtro de Fourier e HHT com sinal mascarado melhorado eram basicamente consistentes com os parâmetros modais “reais” extraídos por análise modal dos respectivos sistemas. Estes dois métodos, HHT com filtro de Fourier e HHT com sinal mascarado melhorado, foram aplicados nos sinais de aceleração de uma plataforma de teste *offshore* tipo jaqueta excitada por um rebocador. Os resultados mostraram a efetividade destes métodos em identificar os parâmetros modais da plataforma, tendo sido os resultados da HHT com sinal mascarado melhorado mais precisos e razoáveis quando comparados com os resultados providos pelo método da seleção de picos (PPM).

1.5.2 Controle Ativo de Plataformas *Offshore*

Kawano e Verkataramana (1992) analisaram o uso do controle ativo para reduzir a resposta dinâmica de plataformas *offshore* sujeitas a abalos sísmicos. Além do carregamento de ondas marítimas, forças sísmicas foram umas das mais importantes excitações na análise de estruturas *offshore*, devido às propriedades probabilísticas do movimento telúrico, cujos resultados foram úteis no projeto confiável da estrutura. A resposta dinâmica de estruturas *offshore* sujeitas a movimentos sísmicos foi totalmente dependente do primeiro modo vibracional da estrutura. O estudo apresentou uma análise sísmica de uma plataforma *offshore* tipo jaqueta que tinha instalado um sistema de controle ativo, baseado em um amortecedor de massa harmônico (Tuned Mass Dumper

- TMD) em conjunto com uma técnica de controle ótimo. Simulações numéricas usando dados do terremoto EL CENTRO (1940) mostraram a efetividade do sistema proposto para reduzir as vibrações e controlar a resposta dinâmica da estrutura.

Segundo Kawano (1993), a resposta dinâmica de uma estrutura *offshore* tipo jaqueta sujeita a excitações de forças de ondas marítimas era principalmente dependente da frequência dominante da força de onda de excitação e da primeira frequência natural da estrutura. O autor mencionou que para conseguir uma redução efetiva da resposta dinâmica de estruturas *offshore*, foi necessário estudar não somente os sistemas TMD, senão também os métodos de controle ativo. Em tal sentido, o trabalho mostra a aplicação da teoria de controle ótimo na implementação simulada de um sistema TMD ativo, concluindo que o mecanismo desenvolvido foi muito efetivo em reduzir a resposta de plataformas *offshore* sob efeitos de forças de ondas.

Em Terro et al. (1999), um controlador por realimentação multi-malha foi aplicado em uma plataforma *offshore* tipo jaqueta sujeita a forças hidrodinâmicas auto excitadas de ondas induzidas, as quais foram simuladas usando a equação não linear de Morison. O projeto do controlador foi baseado na teoria de controle linear quadrático e composto de duas malhas consecutivas: uma malha interna (projeto nominal) para regular a parte linear da dinâmica da plataforma, e uma malha externa (projeto compensatório) para lidar com as não linearidades, mantendo a estabilidade geral do sistema. Resultados de simulações realizadas no modelo de uma plataforma tipo jaqueta de aço de três andares demonstraram a efetividade do esquema de controle proposto, reduzindo as oscilações internas no sistema, gerando, assim, uma resposta mais suave da estrutura.

Suhardjo e Kareem (2001) investigaram o controle das plataformas *offshore* tipo jaqueta submetidas a perturbações de ondas marítimas usando dispositivos passivos e ativos. Dispositivos passivos, tal como o TMD, utilizaram a dinâmica da própria estrutura para dissipar energia. Por outro lado, os dispositivos ativos, tais como o amortecedor de massa ativa (active mass damper – AMD), utilizavam uma fonte de energia externa para gerar a força para controlar a estrutura. Para implementar o controle ativo da plataforma foi usada uma técnica de controle ótimo no domínio da frequência, a qual minimizava a norma H_2 da função de transferência que relacionava a perturbação externa à saída regulada, neste caso o deslocamento. A força de arrasto

hidrodinâmico, para diferentes condições do mar, foi simulada usando o espectro de onda de JONSWAP. Foi demonstrado que os dispositivos de controle eram úteis na redução na resposta do deslocamento de plataformas, especialmente quando as frequências das forças de ondas estavam concentradas perto das frequências naturais da plataforma. Isto era especialmente significativo em águas profundas, porque as frequências naturais das plataformas tipo jaqueta ficavam mais perto das frequências dominantes das ondas nessas situações. Portanto, a adição de dispositivos de controle nas plataformas asseguraria uma redução tanto na resposta global da estrutura como nos seus efeitos locais, como a fadiga nas juntas soldadas.

Li et al. (2003) desenvolveram um procedimento próprio de aplicar o algoritmo de controle H_2 para controlar a vibração lateral de uma plataforma *offshore* tipo jaqueta usando um dispositivo AMD. Uma série de melhorias em relação ao trabalho Suhardjo e Kareem (2001) foi realizada em várias fases do projeto. Diferente do estudo prévio, que usou um modelo de construção de cisalhamento, Li et al. (2003) adotavam o modelo de uma plataforma *offshore* real baseado em uma técnica de elementos finitos. Na implementação do algoritmo H_2 , o controle de vibração foi conduzido no domínio de coordenadas modais. A técnica modal simplificou muito o projeto do filtro da força de onda, na qual a força de onda foi determinada baseada em uma aproximação analítica da forma modal, conjuntamente com o carregamento de onda física, calculado a partir de uma equação de Morison linearizada. Outra melhoria significativa foi em relação à separação dos termos de ruído branco correspondentes ao filtro de força de onda e às incertezas do modelo dinâmico. Esta separação foi importante para atender aos princípios subjacentes associados com o algoritmo H_2 . Esta mudança permitiu que o algoritmo variasse livremente a ponderação do erro entre a medição e o modelo dinâmico do sistema, mantendo o projeto da força de onda intacto. Resultados das simulações mostraram a efetividade da técnica proposta, superando significativamente o controle passivo que usa um dispositivo TMD.

Zribi et al. (2004) apresentaram dois esquemas de controle da resposta dinâmica de uma plataforma *offshore* tipo jaqueta sujeita a excitações de ondas induzidas. O objetivo dos controladores foi reduzir significativamente as oscilações internas no sistema e obter uma resposta suave da plataforma quando submetida a forças hidrodinâmicas não lineares auto-excitadas. O primeiro controlador foi não linear baseado na teoria de Lyapunov. Esse controlador foi composto de uma parte linear de

realimentação de estados, que era usada para melhorar a estabilidade da parte linear do sistema, e de uma parte não linear, que era utilizada para cuidar das não linearidades do sistema. O segundo controlador foi robusto linear por realimentação de estados baseado na teoria de controle ótimo. Resultados das simulações indicaram que ambos os controladores eram capazes de reduzir as oscilações internas do sistema. Ainda mais, o desempenho da plataforma com os controladores propostos foi melhor quando comparado com o desempenho do sistema com um controlador por realimentação da velocidade direta.

Ma et al. (2006) estudaram o controle de vibrações induzidas por ondas irregulares em uma plataforma *offshore* tipo jaqueta com um dispositivo AMD e uma lei de controle ótimo com realimentação e pré-alimentação (FFOC). Para o projeto do controlador, a estrutura *offshore* foi simplificada por um sistema com um grau de liberdade (1DOF), implementada com o primeiro modo de vibração da plataforma, o qual era transformado em um sistema linear discreto com perturbações externas. O controle de vibrações para a estrutura original da plataforma foi formulado como um problema de controle ótimo de um sistema discreto afetado por perturbações persistentes externas com características dinâmicas conhecidas, porém condições iniciais desconhecidas. A condição irregular das ondas foi definida pelo espectro de JONSWAP, para a qual um compensador por pré-alimentação era incluído na lei de controle FFOC. Resultados de simulações, baseadas no modelo da plataforma usado por Li et al. (2003), mostraram que, comparado com o clássico controlador ótimo por realimentação de estados (SFOC), o esquema de controle proposto era mais eficiente em reduzir os deslocamentos e velocidades da estrutura *offshore* sujeito a forças de ondas irregulares.

Ma et al. (2009) seguiram as mesmas ideias de Ma et al. (2006) para analisar o uso do controle ativo na atenuação de vibrações em plataformas *offshore* tipo jaquetas com atraso fixo no controle. Fazendo uso de uma transformação particular, o sistema original com retardo foi reduzido a um sistema de 1DOF sem retardo. Baseado no sistema reduzido, uma lei de controle FFOC com memória (FFOCM) foi desenvolvida. Os termos de memória no FFOCM compensaram o atraso na entrada de controle, a ação por pré-alimentação do controlador incluiu a informação das forças de ondas irregulares e a malha por realimentação incorporou o deslocamento e velocidade da estrutura na lei de controle. O FFOCM foi provado ser existente e único, e capaz de estabilizar o

sistema com atraso. A viabilidade e eficiência da técnica proposta foram demonstradas por simulações de uma plataforma localizada no mar de Bohai, China, tendo sido o FFOCM mais eficiente e robusto que o FFOC, SFOC com memória (SFOCM) e controle preditivo. O FFOCM pôde compensar o atraso na entrada de controle e atenuar as vibrações produzidas pelas ondas de forma eficiente, de modo que o desempenho e estabilidade do sistema puderam ser garantidos.

Zhang et al. (2012) exploraram a capacidade de usar um controlador robusto por modos deslizantes integrais (RISMC) em uma plataforma *offshore* tipo jaqueta, sujeita a forças de ondas induzidas não lineares e perturbações nos parâmetros variantes no tempo. O estudo foi realizado sobre o modelo de 2DOF de uma plataforma que levava acoplado um dispositivo TMD ativo instalado no topo da estrutura. O TMD ativo foi conectado a um mecanismo servo hidráulico, o qual era acionado por uma força de controle para reduzir as vibrações pelo movimento de um amortecedor. Resultados de simulações numéricas mostraram que o controlador RISMC reduzia as oscilações internas da plataforma a um nível satisfatório, estabilizando o modelo dinâmico da estrutura, e também reduzia a força de controle necessária, quando comparado com a força provida por um controlador não linear (NLC) e por um controlador por realimentação da saída dinâmica (DOFC).

Zhang et al. (2013) trataram do controle H_∞ com atraso para uma plataforma *offshore* tipo jaqueta submetida a forças de ondas externas. Introduzindo artificialmente um retardo apropriado no canal de controle, o controlador H_∞ com atraso foi projetado para atenuar vibrações induzidas por ondas em plataformas *offshore* e, desse modo, melhorar o desempenho do sistema de controle. O problema de controle foi transformado em um problema de minimização não linear. Resultados de simulações realizadas no modelo de 1DOF de uma plataforma com dispositivo AMD mostraram que, comparado com o controle H_∞ sem atraso, e embora as amplitudes das vibrações da plataforma fossem as mesmas com ambos os esquemas, a força de controle fornecida pelo controlador H_∞ com atraso foi bem menor. Mais ainda, quando comparado com o controlador FFOC, tanto as amplitudes das vibrações da plataforma como a força de controle requerida com o controlador H_∞ com atraso foram menores do que aquelas com o controlador FFOC.

1.6 Escopo do Trabalho

A presente Dissertação de Mestrado está dividida nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Introdução. Neste capítulo é apresentado o contexto, a motivação e os objetivos desse trabalho, assim como uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema proposto.

Capítulo 2 – Plataformas *Offshore* Fixas Tipo Jaqueta. Este capítulo discute os tipos de plataformas *offshore* fixas, fazendo ênfase na do tipo jaqueta, os elementos e comportamento estrutural de uma jaqueta, perturbações comuns que afetam a operação das plataformas fixas tipo jaqueta.

Capítulo 3 – Amortecedores de Massa e Modelagem da Plataforma. Este capítulo mostra os três tipos de amortecedores mais usados no controle de estruturas e o modelo dinâmico da plataforma, usado para o desenvolvimento do presente trabalho, e sua respectiva resposta dinâmica devido ao carregamento de ondas e correntes marinhas.

Capítulo 4 – A Transformada de Hilbert-Huang para Detecção de Anomalias em Estruturas. Neste capítulo é apresentada a teoria da Transformada de Hilbert-Huang (HHT) e seu uso para identificação de parâmetros modais tais como frequências naturais e fatores de amortecimento de uma estrutura. A eficiência da técnica é testada em um sistema massa-mola de um grau de liberdade.

Capítulo 5 – Aplicações e Resultados da HHT no Modelo da Plataforma *Offshore*. Neste capítulo é apresentada a aplicação da HHT com os sinais obtidos do modelo da plataforma *offshore* do capítulo 3, para identificação dos parâmetros modais dos dois primeiros modos de vibração da estrutura. Os parâmetros identificados são comparados com os dados de projeto da plataforma.

Capítulo 6 – Controle da Plataforma *Offshore* Sujeita a Perturbações Persistentes. Este capítulo apresenta a teoria do controle ótimo Linear-Quadrático (LQ) e o projeto de um controlador LQ para redução das oscilações no modelo simulado da plataforma *offshore*, provocados pelo carregamento de ondas e correntes marinhas.

Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações. Neste último capítulo discutem-se os resultados obtidos nos capítulos 5 e 6 e faz-se sugestões e recomendações para a continuidade do trabalho.

Capítulo 2

Plataformas *Offshore* Fixas Tipo Jaqueta

2.1 Introdução

Plataformas *offshore* fixas são aquelas que se estendem até o fundo do mar, suportadas por uma fundação que mantém a plataforma fixada no local de instalação por um longo período. Estas estruturas têm a finalidade básica de sustentar o convés e os módulos de operação e, uma vez instaladas, estarão imersas no mar, em meio líquido corrosivo, sujeitas a cargas ambientais de onda, correntes, ventos etc.

Há plataformas fixas para produção de óleo e gás em cerca de 50 países. As principais áreas com essas instalações são: Golfo do México com 4000, Ásia com 950, Oriente Médio com 700, Mar do Norte com 490, Costa Oeste Africana com 380 e América do Sul, com 340 instalações (Menezes, 1997).

As plataformas fixas não são utilizadas em águas profundas (no Brasil, consideradas acima de 400 metros), pois a estrutura tende a ser muito esbelta e os seus períodos naturais se aproximam dos períodos das ondas ou de seus harmônicos. Os efeitos dinâmicos passam a ser importantes e, decorrente disso, para evitar a amplificação dinâmica excessiva, é necessário aumentar a rigidez da estrutura, acarretando aumento considerável de peso, aumento nos custos de fabricação, transporte e instalação. Estes fatores limitam técnica e economicamente seu uso em águas profundas (Menezes, 2007).

A utilização do tipo de plataforma fixa depende da profundidade da lâmina d'água às condições de mar, relevo do fundo do mar, finalidade do poço, disponibilidade de apoio logístico, dentre outros fatores. Uma das características particulares às estruturas das plataformas fixas consiste na necessidade de se considerar simultaneamente (Menezes, 2007):

- O solo na análise das fundações, em que conhecimentos de geotecnia interagem com a análise estrutural em um modelo de elementos finitos. Devem ser considerados aspectos tais como amortecimento e efeitos não-lineares, que incluem a plasticidade do solo;
- O fluido, na definição dos carregamentos e de parâmetros dinâmicos como massa e amortecimento. O cálculo das cargas devidas ao fluido é basicamente um problema hidrodinâmico interligado à análise estrutural;
- A estrutura propriamente dita.

As plataformas fixas compreendem as plataformas tipo jaqueta e as plataformas de gravidade. A ênfase do presente trabalho está nas plataformas fixas tipo jaqueta, as quais serão tratadas com maiores detalhes na sequência.

2.2 Jaqueta

Segundo a Organização Nacional da Indústria do Petróleo (ONIP), jaqueta é o elemento estrutural de suporte de uma plataforma fixa, que vai desde a fundação até pouco acima do nível do mar. Sobre a jaqueta (considerada a subestrutura da plataforma) é instalada uma superestrutura que contém os *topsides* (convés e módulos), projetada para receber todos os equipamentos de perfuração, geração de energia elétrica, estocagem de materiais, alojamento de pessoal, bem como todas as instalações necessárias para a produção dos poços. Além disso, a jaqueta também oferece apoio aos condutores e *risers* de exploração, em sua subida até a unidade de processamento da plataforma.

Dentre as plataformas *offshore* fixas, a tipo jaqueta é a mais difundida, sendo usada em lâminas d'água de até 400 metros, profundidade nas quais as plataformas fixas por gravidade, plataformas auto elevatórias e plataformas tipo torre também concorrem. Além disso, a plataforma tipo jaqueta é a mais econômica e fornece uma ótima estabilidade, devido à sua base bem maior em relação ao topo, sendo projetada para resistir aos esforços provenientes de ondas, ventos, correntes marinhas, terremotos, icebergs etc.

As jaquetas são comumente compostas de elementos espaciais tubulares de aço, completamente contra ventadas e ancoradas no local de operação por estacas cravadas no fundo do mar. Os elementos tubulares são de paredes finas quando comparadas aos

seus diâmetros e, devido às seções fechadas, proporcionam empuxo, aliviando as fundações, além de proporcionar grande rigidez torcional, superfície mínima para pintura e ataque corrosivo, simplicidade de forma e aparência agradável. Nas suas partes submersas, os componentes tubulares são projetados de forma circular, buscando a minimização das forças hidrodinâmicas em relação aos membros tubulares de seção quadrada ou retangular.

O diâmetro das estacas de fundação da jaqueta é da ordem de 2 metros e penetram até aproximadamente 100 metros abaixo do fundo do mar. Existem basicamente três tipos de arranjos de estacas: as estacas instaladas no interior da perna da jaqueta, instaladas através das chamadas luvas com guias anexas às pernas seguindo o mesmo ângulo e estacas instaladas com luvas verticais ligadas à base da jaqueta (Menezes, 2007).

A Figura 2.1 mostra o esquema de uma plataforma fixa tipo jaqueta. A plataforma não tem capacidade de estocagem de petróleo ou gás, tendo o mesmo que ser enviado para a terra através de oleodutos e gasodutos, ou a navios acoplados à plataforma.



Figura 2.1 – Esquema de uma plataforma fixa tipo jaqueta (Fonte: Petrobras)

O projeto estrutural de uma plataforma tipo jaqueta exige a competência de diferentes áreas da ciência e engenharia. Algumas informações necessárias ao projeto são resumidas a seguir (Martinez, 2012):

- Finalidades da plataforma, as quais fornecem os primeiros elementos para a concepção da estrutura e que normalmente são: perfuração, produção, sustentação de poços, habitação, etc., ou combinação destas;
- Área onde a plataforma será instalada de forma a orientar quanto ao tipo e grandeza das forças às quais a estrutura estará sujeita (ventos, correntes, ondas etc.). A localização precisa é também de grande importância para o levantamento dos parâmetros do solo, necessários ao cálculo das fundações, para os dados estatísticos dos estados de mar na região, bem como para uma orientação sobre a escolha da onda de projeto a ser adotada;
- Profundidade da lâmina d'água, a qual influirá decisivamente nas dimensões da jaqueta, métodos de construção e lançamento;
- Número de poços a serem atendidos, que dá elementos para a avaliação das áreas de convés necessárias. Os condutores são responsáveis por grande parte da carga lateral, devida às ondas e correntes marinhas sobre a estrutura. Os poços em número elevado podem responder por mais de 50% da carga lateral, sendo um fator importante no dimensionamento da jaqueta e das estacas; e,
- Altura dos conveses, que deve ser maior que a altura atingida pela “maior onda prevista na área” durante a vida útil da plataforma, dentro de determinadas probabilidades adotadas no projeto.

2.3 Elementos Estruturais de uma Jaqueta

Jaquetas são estruturas que exigem uma normalização própria, por tratarem-se de um sistema de grande porte, totalmente montado em terra, embarcado em uma balsa para ser transportado e lançado ao mar, para então ser instalado no local determinado em projeto (veja Figura 2.2).

As jaquetas são constituídas por elementos tubulares com ligações discretas, formando uma estrutura reticulada do tipo pórtico espacial, com elevado grau de hiperestaticidade. De acordo com a sua função, e segundo a norma Petrobras N-2267

(Petrobras, 1998), os elementos estruturais de uma jaqueta podem ser classificados como (veja Figura 2.3) (Almeida, 2008; Bravo, 2011):

- *Ligação perna-convés* – Parte superior das pernas, onde é encaixada a base das colunas do convés através de uma transição cônica;
- *Pernas* – Principais membros da jaqueta, responsáveis pela transição dos esforços para as estacas;
- *Luvras das estacas* – As luvras abrigam as estacas em seu interior conectando-as às pernas através de estruturas com grande rigidez, constituídas por treliças ou por chapas, ou mesmo por uma combinação das duas;
- *Estacas* – As estacas são responsáveis pela transferência dos esforços entre a jaqueta e o solo. Usualmente possuem uma pequena inclinação, o que favorece a absorção de esforços provenientes de carregamentos horizontais, mas em alguns casos as estacas podem ser verticais;
- *Membros diagonais e horizontais das faces* – Ambos possuem a função de travamento das pernas, diminuindo seu vão livre, aumentando sua resistência;
- *Membros horizontais das mesas* – Membros internos às faces que fazem parte das mesas, oferecendo rigidez ao conjunto estrutural.
- *Juntas* – São elementos que possuem grande influência na estabilidade global da estrutura e são rigorosamente analisadas visando garantir sua integridade por esforços sofridos pela ação da fadiga.

Os componentes estruturais de uma jaqueta devem ser dimensionados para resistir às solicitações de carregamento que podem ser relacionadas às fases de sua constituição: montagem, instalação (embarque, transporte marítimo e instalação propriamente dita); e operacional. Na fase operacional, os carregamentos são de natureza ambiental, representados principalmente pelas ações dos ventos, das correntes, das ondas e dos abalos sísmicos. Esse conjunto de solicitações da fase operacional é combinado levando-se em conta duas condições básicas, diretamente associadas às magnitudes das manifestações da natureza, nomeadas como condição de operação e condição de tormenta (Bravo, 2011).



Figura 2.2 – Jaqueta da plataforma de Mexilhão sendo transportada até a Bacia de Campos (pedesenvolvimento.com, 2009)

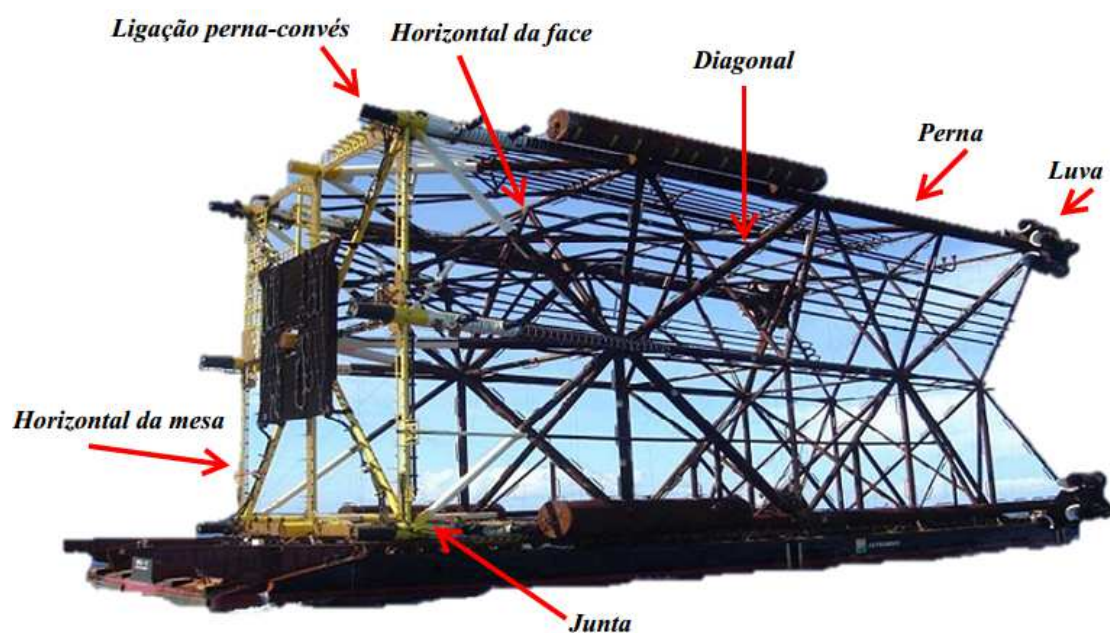


Figura 2.3 – Elementos de uma jaqueta (Bravo, 2011)

2.4 Comportamento Estrutural de uma Jaqueta

Os elementos estruturais de uma jaqueta são submetidos predominantemente a esforços axiais de tração e compressão. São estruturas com grande capacidade de redistribuir os esforços internos após a falha de algum de seus elementos. Seu comportamento global é semelhante a uma viga em balanço, engastada no fundo do mar (Almeida, 2008).

A falha estrutural se inicia pelos elementos mais esbeltos sob compressão, que deixam absorver os esforços e sofrem um descarregamento seguido de redistribuição das tensões na estrutura. Para verificar essa capacidade de redistribuição dos esforços, é necessário efetuar a análise estrutural considerando as não linearidades geométricas e físicas, para representar a real resposta da estrutura diante dos carregamentos impostos e com isso projetar estruturas que tenham a capacidade de se adaptar a uma falha localizada. A sequência de falhas individuais de vários elementos, resultando no colapso da estrutura, é chamada de falha progressiva e a carga última que leva a estrutura ao colapso é determinada por uma análise de *pushover* (Menezes, 2007).

As jaquetas, consideradas estruturas relativamente rígidas, possuem períodos naturais de oscilação típicos de 0,5 até 6 segundos, bem menores que os períodos de excitação das ondas de projeto, que em condições extremas têm períodos de 10 segundos, aproximadamente. Assim, os efeitos dinâmicos são poucos significativos, fazendo possível desprezar as forças de inércia usadas na análise dinâmica (Menezes, 2007).

Em profundidades intermediárias de 200 a 400 metros, as jaquetas têm maior porte e a estrutura tende a ser mais esbelta, com períodos naturais de oscilação próximos dos períodos de excitação das ondas, em especial o segundo harmônico, tendo efeitos dinâmicos importantes que podem ser tratados por métodos simplificados através de análise no domínio da frequência considerados nas análises de fadiga (Menezes, 2007).

2.5 Perturbações em Plataformas *Offshore*

As condições ambientais dominam os métodos de projeto e operação das construções *offshore*. Infelizmente pouca atenção tem sido dada a esse assunto na

literatura. Nesta seção, são discutidas algumas perturbações persistentes que interferem na construção e operação de plataformas no ambiente marinho.

2.5.1 Pressão Hidrostática e Flutuação

A pressão externa da água do mar age em uma estrutura e em todas as suas partes segundo a lei hidráulica, na qual a pressão é diretamente proporcional à profundidade. A pressão hidrostática é ligada ao conceito de flutuação, o qual tem como fundamento o princípio de Arquimedes, que menciona que um objeto flutuante desloca um peso de água igual ao seu próprio peso. Em outras palavras, o corpo afunda no fluido até ser equilibrado pelo empuxo. No caso de afundamento do objeto, o peso na água pode ser considerado como o deslocamento do peso da água ou a ação da diferença de pressão hidrostática. A pressão hidrostática não somente exerce uma força de colapso, como também tende a comprimir o material da estrutura. Isso pode ser significativo em grandes profundidades, e mesmo em profundidades pequenas, com material de baixo índice de elasticidade, a exemplo das espumas isolantes feitas de plástico (Gerwick Jr., 2007).

2.5.2 Temperatura

A temperatura da superfície do mar normalmente varia de -2°C a 32°C , sendo que a alta temperatura pode decair rapidamente com a profundidade, atingindo um valor estacionário de 2°C a uma profundidade de 100m.

A temperatura do ar passa por uma grande variação. Nos trópicos, onde a temperatura pode chegar aos 40°C , a umidade é extremamente alta, resultando em uma rápida evaporação, produzindo assim um “nevoeiro de sal” toda as manhãs, causando uma condensação salina na superfície das estruturas que com o tempo é corrompida.

A temperatura afeta também o crescimento de organismos marinhos que influenciam diretamente na quantidade de oxigênio dissolvido na água. Esse fenômeno contribui nas reações de corrosão (Gerwick Jr., 2007).

2.5.3 Corrosão e Organismos Marinhos

A característica química predominante da água do mar é o sal diluído, que tipicamente constitui 3,5% do seu peso. Os principais íons são o sódio (Na^{+}), magnésio (Mg^{2+}), cloretos (Cl^{-}) e sulfatos (SO_4^{-}). A consideração desses íons é importante para a

construção de estruturas *offshore*. O cloreto age na redução do revestimento de proteção de oxidação que se forma sobre o aço, e assim acelera a corrosão. O magnésio gradualmente substitui o cálcio em vários tipos de compostos químicos do concreto. Os sais de magnésio possuem alta permeabilidade e solubilidade. Os sulfatos atacam o concreto, afetando a pasta de cimento e os agregados, causando expansão e desintegração dos elementos.

O oxigênio está presente no ar e faz uma interface com a superfície do mar, e está presente na água em forma de pequenas bolhas de ar como oxigênio dissolvido. O oxigênio desempenha um papel muito importante na corrosão do aço no ambiente marinho, e por isso o aço deve ser preparado com uma pintura especial, revestido ou coberto com concreto.

Os organismos marinhos causam inúmeros efeitos na estrutura *offshore*. O principal deles é o aumento da força de arrasto devido à obstrução do fluxo livre da água que passa na superfície da estrutura. Eles causam também as “sujeiras”. Cracas e algas aumentam o diâmetro das tubulações de aço, aumentam também a rugosidade da superfície. Devido a esta última, o valor do coeficiente de arrasto C_D utilizado na equação de Morison é muitas vezes aumentado de 10% a 20% (Gerwick Jr., 2007).

2.5.4 Correntes

As correntes, mesmo quando de pequena magnitude, tem um efeito significativo sobre a construção e operações de uma plataforma. Elas têm uma influência sobre o movimento das estruturas flutuantes e em suas amarras. As correntes mudam as características das ondas, exercem pressões contra as superfícies horizontais estruturais e, devido ao efeito de Bernoulli, desenvolvem forças de empuxo. As correntes podem criar padrões de redemoinhos em torno das estruturas e, também, causar vórtice, deslocando as estacas, amarras, tubulações etc.

Existem vários tipos de correntes: circulação oceânica, geotrópica, das marés, do vento, correntes de densidade, bem como correntes por conta da vazão do rio. Algumas destas podem ser sobrepostas umas sobre as outras, muitas vezes em diferentes direções.

Estudos recentes no oceano e em projetos em águas profundas indicam que, em muitos casos, as velocidades de corrente no estado estacionário, perto do fundo do mar,

são quase tão altas como as perto da superfície. Fortes correntes podem causar o surgimento de vórtices em *risers* e estacas, e vibrações nas linhas e dutos. Os vórtices podem resultar em oscilações dinâmicas cíclicas de cabos, amarras, amarrações tubulares e verticais, tais como empilhamento, o que pode levar à fadiga. Vórtices ocorrem acima de uma velocidade crítica típica de 1,0-1,5 m/s. Esses vórtices giram em um padrão regular, criando zonas alternadas de baixa pressão. As vibrações por causa dos vórtices nas amarras tensionadas têm levado as conexões e junções à fadiga.

As forças das correntes se desenvolvem devido ao arrasto e inércia, esta última sobre a massa total, incluindo a da estrutura e a da água deslocada pela estrutura. A força de arrasto é devida à diferença de pressão a montante e a jusante de certo fluxo em uma região. Essa força é proporcional ao quadrado da velocidade do fluido relativa à estrutura. A força de inércia é a força exercida pelo fluido quando este acelera ou desacelera ao passar pela estrutura. Ela é também a força requerida para segurar uma estrutura rígida em um fluxo de aceleração uniforme e é proporcional a aceleração do fluido (Gerwick Jr., 2007).

2.5.5 Ondas

As ondas são, talvez, a preocupação ambiental mais óbvia para operações *offshore*. Elas causam o balanço em uma estrutura e constituem a causa principal do tempo de inatividade e diminuição da eficiência operacional. As forças exercidas pelas ondas são geralmente o critério de desenho dominante que afetam estruturas fixas.

As ondas são causadas principalmente pela ação do vento sobre a água, que por atrito transmite e “transforma” a energia do vento em energia das ondas. As ondas de água também podem ser geradas por outros fenômenos como deslizamentos de terra, explosões e terremotos. Uma onda é uma perturbação que viaja através superfície do mar. O distúrbio se propaga, porém são as partículas de água dentro do movimento da onda, em uma órbita elíptica quase fechada como uma pequena rede, que se movimenta para frente.

As ondas e as correntes de ondas geradas associadas podem causar grande transporte de sedimentos, erosão, aterros de areia, causando rápida abertura em torno de estruturas recentemente colocadas, especialmente se os efeitos de onda forem sobrepostos com os das correntes. As ondas batem sobre as estruturas, especialmente

nas estruturas de topo achatado ou convés, causando elevação hidrodinâmica (Gerwick Jr., 2007).

2.5.6 Ventos

Conforme Campos (1995), diferenças de temperatura causam diferenças de pressão atmosférica. A taxa de variação de pressão atmosférica entre duas áreas causa o movimento do ar, ou seja, o vento. A direção dos ventos sempre ocorre de regiões de alta pressão (polares) para as de baixa pressão (equatoriais) e sua velocidade está relacionada com a magnitude do gradiente de pressão.

A velocidade do vento aumenta à medida que aumenta a altura com relação ao nível do mar, como a altura do convés de uma plataforma. Por exemplo, o vento, a uma altura de 20 m pode ser 10% maior do que a uma altura de 10 m. Perto do nível do mar o atrito das ondas diminui a velocidade significativamente. Os ventos possuem um papel muito importante no sistema marinho, sobretudo na geração de correntes e ondas.

As cargas devidas às forças do vento são importantes parâmetros ambientais para o projeto de estruturas *offshore*. As forças e momentos gerados são dados importantes para análise do comportamento dinâmico das estruturas flutuantes e dos sistemas de ancoragem, *thrusters*, *risers*, entre outros.

A carga dinâmica dos ventos pode induzir grandes movimentos na região das frequências naturais da estrutura, podendo influenciar as condições de operação e sobrevivência da estrutura (Standing et al., 1990). Outra influência do vento na estrutura, principalmente quando atuando juntamente com ondas, é o amortecimento ou amplificação gerada pela sua pressão nas obras mortas (partes da estrutura que não estão em contato com a água) alterando o período de oscilação ou a amplitude de resposta do conjunto.

Como ilustração, a Figura 2.4 mostra as principais perturbações que afetam as plataformas *offshore* tipo jaqueta.

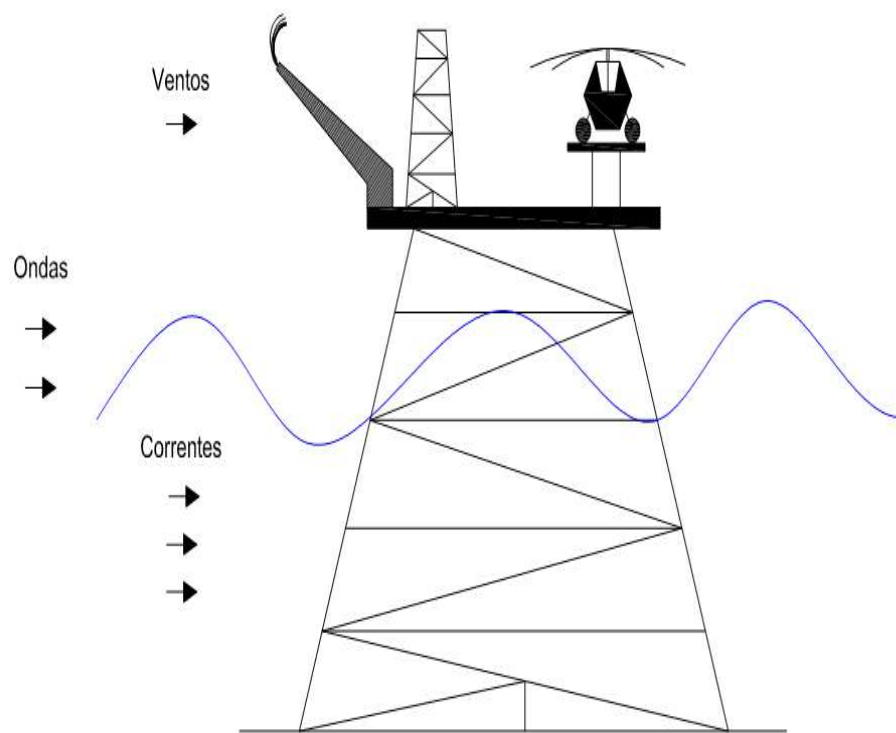


Figura 2.4 – Principais perturbações em plataformas *offshore*

Capítulo 3

Amortecedores de Massa e Modelagem da Plataforma

3.1 Introdução

Uma estrutura *offshore* suporta diariamente fortes perturbações de várias forças hostis. Para conseguir vencer esses desafios existem dois caminhos: o primeiro consiste em aumentar a faixa de frequência natural da estrutura para que não ocorra a ressonância, por meio do aumento da rigidez, através de um projeto de redimensionamento de toda a estrutura; aumentando o diâmetro e conseqüentemente a massa de toda a estrutura. Porém esse projeto gera um custo excessivo de material e mão de obra. A segunda alternativa é a implementação de mecanismos de controle passivo ou ativo para regular o movimento conforme o desejado (Jangid, 2005). Para isso existem três tipos de amortecedores muito utilizados para o controle de vibrações causadas pelas ondas e correntes existentes no ambiente marinho.

3.2 Amortecedor de Massa Ativo (AMD)

Um sistema de controle estrutural ativo é um que tenha a capacidade de determinar o estado atual da estrutura, decidir sobre um conjunto de ações que vão mudar este estado para um mais desejável, e realizar essas ações em uma forma controlada e num curto período de tempo. Tais sistemas de controle podem teoricamente acomodar mudanças ambientais imprevisíveis, conhecer requisitos exigentes de desempenho em uma ampla gama de condições de funcionamento, e compensar falha de um número limitado de componentes estruturais. Além disso, eles podem ser capazes de oferecer soluções mais eficientes para uma ampla gama de aplicações, desde pontos de vista técnicos e financeiros (Connor, 2002).

Um Amortecedor de Massa Ativa (AMD) é um dispositivo de controle ativo que consiste num sistema amortecedor massa mola com uma força de controle U que amplia o amortecimento em uma estrutura. O AMD é muito usado porque consegue reduzir a resposta dinâmica da estrutura em uma ampla faixa de frequência. A Figura 3.1 mostra o esquema de AMD, em que a variável U denota a força de controle ativo.

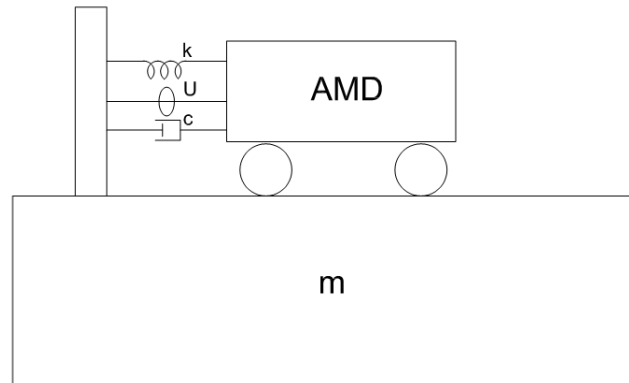


Figura 3.1 – Amortecedor de massa ativo

3.3 Amortecedor de Massa Sintonizado Passivo (TMD)

O amortecedor de massa sintonizado passivo, conhecido como absorvedor harmônico, é um dispositivo montado sobre uma estrutura para reduzir a amplitude de vibrações mecânicas. Esse tipo de amortecedor não requer o uso de força externa e por isso ele é um pouco limitado, porém considerando o excessivo custo de solda e de fabricação submersa dos dispositivos de controle ativo, o uso de mecanismos de controle passivo é uma ideia atrativa, pois melhora o comportamento dinâmico existente nas plataformas *offshore*. A Figura 3.2 mostra o dispositivo (Golafshani, 2009).

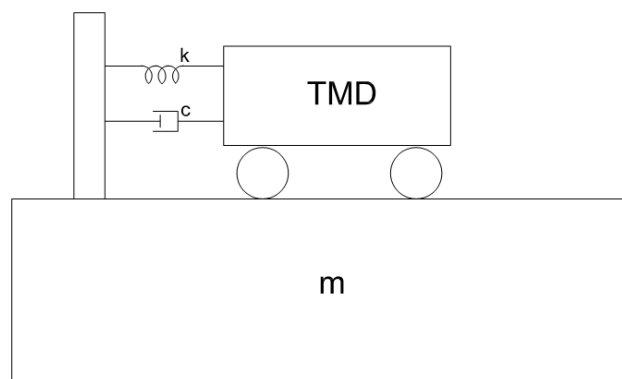


Figura 3.2 – Amortecedor de massa sintonizado

3.4 Amortecedor de Massa Sintonizado Ativo (aTMD)

O amortecedor de massa sintonizado ativo é muito usado no controle de vibrações de estruturas. Esse dispositivo, inicialmente idealizado apenas como amortecedor de massa sintonizada foi projetado para controle ativo para grandes construções e sugerido posteriormente para controle passivo.

Hoje essa técnica vem sendo muito usada no controle ativo de plataformas *offshore*. Basicamente o aTMD pode ser projetado de duas maneiras, uma com dispositivo de massa auxiliar e outra só com o amortecedor, que é a mais usada, como ilustrado nas Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente.

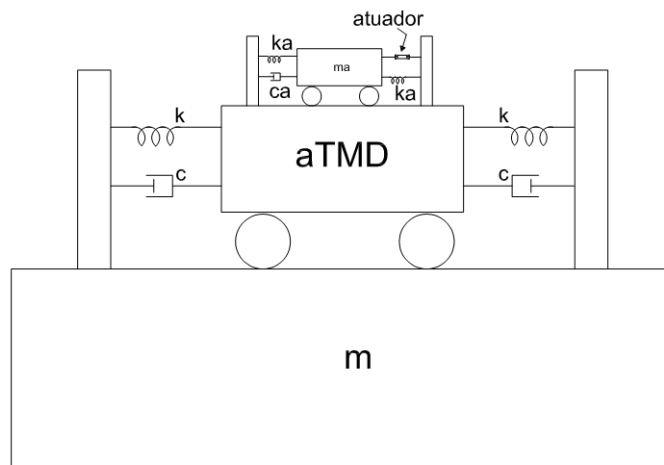


Figura 3.3 – Amortecedor de massa sintonizado ativo com massa auxiliar

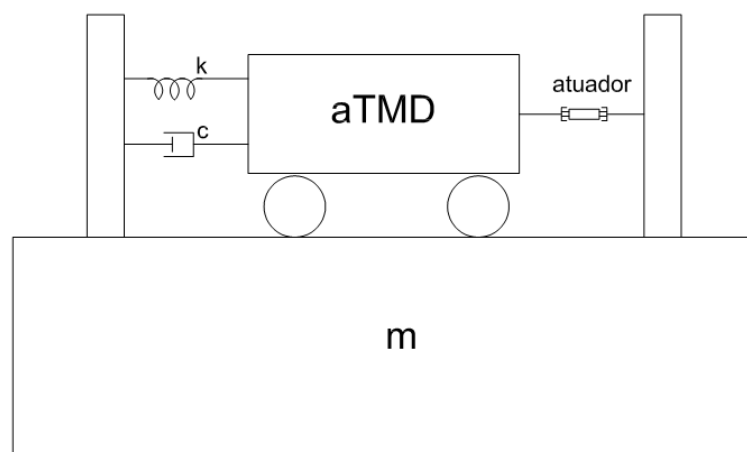


Figura 3.4 – Amortecedor de massa sintonizado ativo

3.5 Atuadores

O componente atuador do sistema de controle gera e aplica as forças de controle em locais específicos sobre a estrutura de acordo com as instruções do controlador.

Ao longo das últimas décadas, uma série de dispositivos de geração de força foram desenvolvidos para uma ampla gama de aplicações de controle de movimento. Estes dispositivos podem ser descritos em termos de parâmetros de desempenho, tais como tempo de resposta, força máxima e requisitos operacionais, tais como a potência de pico e a demanda total de energia. O dispositivo ideal é aquele que pode proporcionar uma grande força em um curto período de tempo para uma entrada de menor energia (Connor, 2002).

Estruturas civis, em geral, exigem grandes forças de controle, da ordem de um meganewton e, para excitação sísmica, tempos de resposta da ordem de milissegundos. A exigência de força máxima, juntamente com a restrição na demanda de energia, é muito difícil de conseguir com um sistema de força de acionamento totalmente ativo. Existem sistemas de atuadores de força capazes de distribuir grande força, mas que também têm uma elevada demanda de energia (Connor, 2002).

3.6 Esquema da Aplicação da Força

O desenho esquemático contido na Figura 3.5 mostra uma composição típica de atuadores lineares hidráulicos, eletromecânicos e eletromagnéticos. Existem dois elementos básicos, um pistão e um mecanismo que comporta o pistão, no qual através de um conjunto interno de engrenagens, desloca o pistão por aplicação de uma força em sua extremidade. A interação do pistão com um corpo adjacente produz um par de forças de contato F no ponto de contato e uma força de reação correspondente ao apoio do atuador. Se o corpo move-se sob a ação de F , o mecanismo geralmente compensa este movimento de tal modo que a força permanece constante até que se mude as instruções do controlador para alterar a magnitude de força (Connor, 2002).

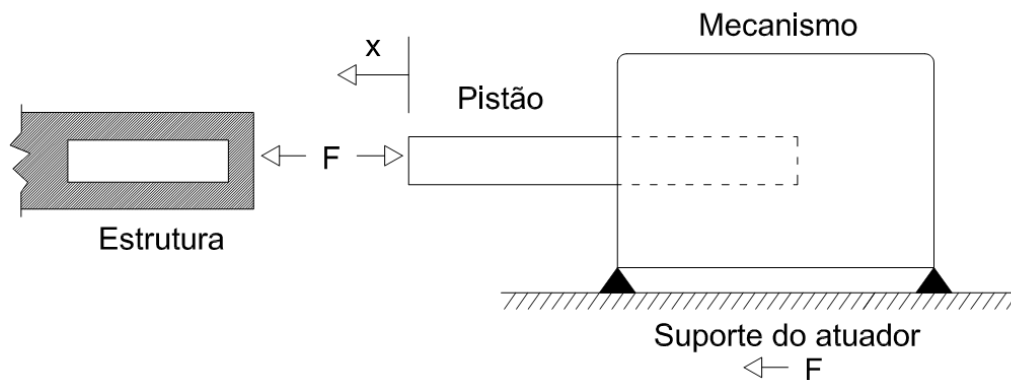


Figura 3.5 – Esquema de um atuador hidráulico linear (Connor, 2002)

Este tipo de atuador é o mais amplamente disponível e utilizado, em particular para aplicações que requerem uma grande força em curto tempo de resposta. O termo hidráulico, eletromecânico e eletromagnético refere-se à natureza dos mecanismos de geração de força. Estes dispositivos geralmente têm uma alta demanda de energia.

3.7 Modelo Dinâmico da Plataforma

O método de elementos finitos (FEM) é comumente utilizado na modelagem e análise estrutural de plataformas *offshore* tipo jaqueta. O FEM proporciona uma maneira prática para o estudo de estruturas *offshore* sujeitas a cargas ambientais. Pacotes comerciais baseados em FEM de propósitos gerais, como o ANSYS, ou de aplicações específicas, como o SACS, são usados para essa finalidade.

Aplicando o método de elementos finitos, uma plataforma fixa *offshore* pode ser modelada como um sistema com múltiplos graus de liberdade (MDOF). Porém, dado que a resistência típica às ondas da estrutura *offshore* é projetada para ter uma frequência fundamental maior que a frequência de onda dominante, a resposta da estrutura é sempre dominada pelo primeiro (e segundo) modo(s) de vibração. Assim, os primeiros modos de resposta são os que mais contribuem na concepção do modelo dinâmico e, portanto, a plataforma pode ser representada como um sistema de ordem reduzida de 1DOF ou 2DOF. Em geral, essa simplificação é adequada para o estudo de controle de vibrações (Ma et al., 2006). Como exemplos, Li et al. (2003), Ma et al. (2006, 2009) e Zhang e Tang (2013) usaram um modelo de 1DOF, enquanto que Terro et al (1999), Zribi et al. (2004) e Zhang et al (2012) têm usado um modelo de 2DOF.

Para os propósitos do presente trabalho, um modelo de 2DOF será considerado para representar uma plataforma *offshore* tipo jaqueta, conforme proposto em Abdel-Rohman (1993, 1996), e cujo diagrama esquemático é mostrado nas Figuras 3.6 e 3.7. A estrutura consiste de membros tubulares cilíndricos de aço, com as dimensões mostradas na Figura 3.7 e na Tabela 3.1. As áreas projetadas, volumes e massas de cada membro da estrutura são dados na Tabela 3.2. Um dispositivo TMD ativo (aTMD), conectado a um servo mecanismo hidráulico, é instalado no topo e acoplado à junção 8. O movimento do amortecedor é influenciado pelo movimento da estrutura e a operação do servo mecanismo, a qual é acionada por uma força de controle ativo produzida por um controlador.

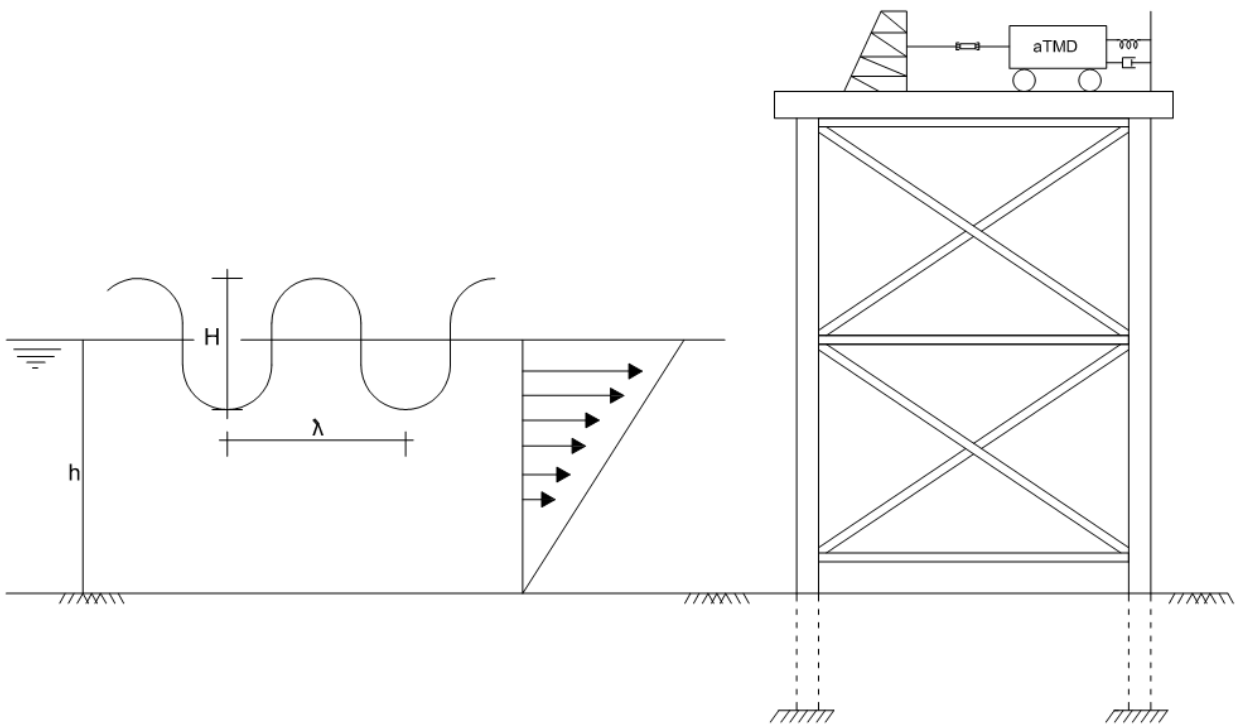


Figura 3.6 – Plataforma sujeita a forças hostis (Zribi et al., 2004)

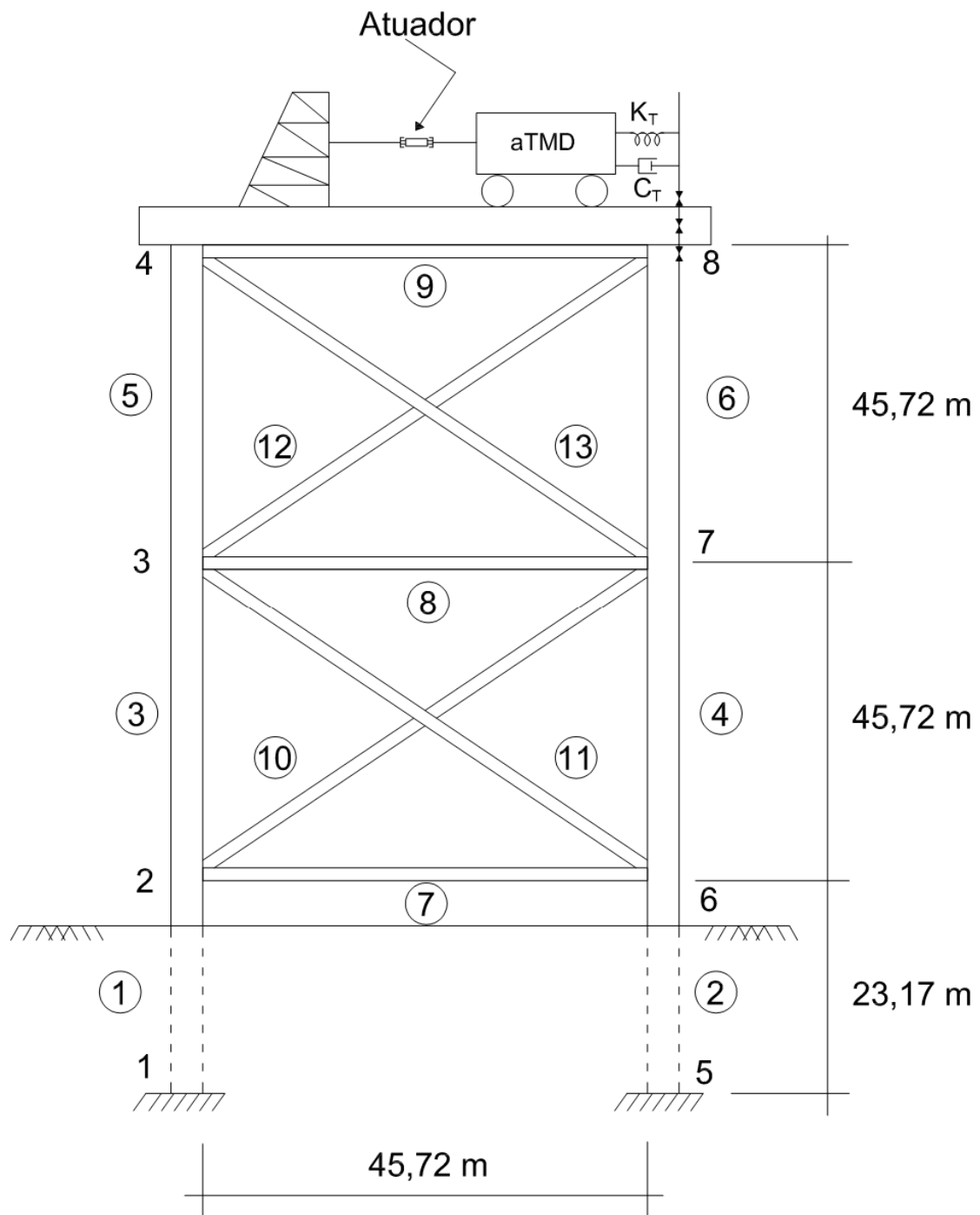


Figura 3.7 – Plataforma detalhada (estrutura + dispositivo TMD ativo (aTMD))

Tabela 3.1: Propriedades dos tubos de aço cilíndricos (Zribi et al., 2004)

Membros	Diâmetro Externo (m)	Diâmetro Interno (m)	Área (m²)	Momento de Inércia (m⁴)
Vertical	1,22	1,14	0,141	0,02301
Horizontal	0,61	0,59	0,023	0,00096
Diagonal	0,61	0,59	0,023	0,00096

Tabela 3.2: Dados de projeto dos membros da estrutura (Zribi et al., 2004)

Membros	Área A_p (m²)	Volume B_p (m³)	Massa (kg)
1	---	---	---
2	---	---	---
3	55,74	53,38	98080,60
4	55,74	53,38	98080,60
5	37,16	35,58	86462,00
6	37,16	35,58	86462,00
7	---	---	20706,12
8	---	---	20706,12
9	---	---	8087,58
10	27,87	13,34	29274,63
11	27,87	13,34	29274,63
12	18,58	8,89	23328,93
13	18,58	8,89	23328,93

Frequências naturais e formas modais da resposta livre não amortecida do sistema podem ser determinadas usando alguma ferramenta computacional de análise estrutural. Embora se possam considerar muitos modos de vibração, assume-se que as perturbações externas, neste caso correntes e ondas marinhas, atuam nos dois primeiros modos de vibração, devido a que estes dois modos são os mais dominantes. Sendo assim, as equações de movimento da estrutura com o TMD são (Zribi et al., 2004):

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 = -2\xi_1 w_1 \dot{z}_1 - w_1^2 z_1 - \Phi_1^T (F_a - F_{TMD}) + f_1 + f_2 \\ \ddot{z}_2 = -2\xi_2 w_2 \dot{z}_2 - w_2^2 z_2 - \Phi_2^T (F_a - F_{TMD}) + f_3 + f_4 \\ \ddot{y} = -2\xi_T w_T (\dot{y} - \dot{U}_8) - w_T^2 (y - U_8) + \frac{1}{m_T} u \end{cases} \quad (3.1)$$

sendo que z_1 e z_2 são as coordenadas generalizadas dos modos vibracionais 1 e 2, respectivamente; y é o deslocamento horizontal do TMD; w_1 e w_2 são as frequências naturais dos primeiros dois modos de vibração; ξ_1 e ξ_2 são os fatores de amortecimento nos dois primeiros modos de vibração, respectivamente; Φ_1 e Φ_2 são o primeiro e o

segundo vetores de forma modal, respectivamente; F_{TMD} é o vetor de força de controle passivo devido ao TMD; F_a é o vetor de força de onda; ξ_T é o fator de amortecimento do TMD; $w_T = \sqrt{K_T/m_T}$ é a frequência natural do TMD; K_T e m_T são a rigidez e a massa do TMD, respectivamente; U_8 é o deslocamento horizontal da junção 8 na estrutura *offshore*; u é a ação de controle; e f_1 , f_2 , f_3 e f_4 são os termos da força hidrodinâmica auto-excitada não linear, cuja derivação é apresentada a seguir.

Dado que a resposta é a contribuição de dois modos, o deslocamento horizontal da junção 8 na estrutura é (Abdel-Rohman, 1993):

$$U_8 = \phi_1 z_1 + \phi_2 z_2 \quad (3.2)$$

sendo que ϕ_1 e ϕ_2 são as contribuições das duas primeiras formas modais. Note que:

$$\Phi_1^T F_a = \phi_1 u \quad (3.3)$$

$$\Phi_2^T F_a = \phi_2 u \quad (3.4)$$

As forças de controle devido ao TMD podem ser escritas como (Zribi et al., 2004):

$$\Phi_1^T F_{TMD} = \phi_1 [K_T(y - U_8) + C_T(\dot{y} - \dot{U}_8)] \quad (3.5)$$

$$\Phi_2^T F_{TMD} = \phi_2 [K_T(y - U_8) + C_T(\dot{y} - \dot{U}_8)] \quad (3.6)$$

em que C_T é o amortecimento do TMD.

Estruturas *offshore* estão expostas a forças hidrodinâmicas não lineares. A não linearidade destas forças decorre da sua dependência em relação à flexibilidade da estrutura, que induz um termo de carga auto-excitado. Uma força de onda horizontal atuando na junção p de uma estrutura *offshore* é geralmente modelada usando a equação de Morison (Chakrabati, 1987; Patel, 1989). A equação de Morison é amplamente utilizada para estimar cargas de ondas no projeto de plataformas de petróleo e outras estruturas *offshore*. Para ondas planas unidirecionais, na presença de correntes de água induzidas pelo vento, esta equação é da forma (Zribi et al., 2004):

$$F_p = \frac{1}{2} \rho_w C_D A_p |U'_{px}| U'_{px} + \rho_w C_I B_p a_{px} - \rho_w (C_I - 1) B_p \ddot{U}_p \quad (3.7)$$

Sendo que F_p é o vetor de força de onda; ρ_w é a densidade da água; C_D é o coeficiente de arrasto; A_p é a área concentrada na junção p ; U_{px} é a velocidade horizontal da água na junção p ; $\dot{U}_p$ é a velocidade horizontal de junção na junção p ; $U'_{px} = U_{px} - \dot{U}_p$ é a velocidade relativa da água na junção p ; C_I é o coeficiente de inércia; B_p é o volume concentrado na junção p ; a_{px} é a aceleração horizontal da água na junção p ; e $\ddot{U}_p$ é a aceleração horizontal de junção na junção p .

Da teoria de ondas lineares (Chakrabati, 1987; Patel, 1989), a velocidade horizontal da água na junção p é expressa como:

$$U_{px} = E_p \cos(kx_p - \Omega t) + U_{ow} \frac{y_p}{h} \quad (3.8)$$

A aceleração horizontal da água na junção p é:

$$a_{px} = \Omega E_p \sin(kx_p - \Omega t) \quad (3.9)$$

Em que

$$E_p = \frac{\Omega H}{2} \frac{\cosh(ky_p)}{\sinh(kh)} \quad (3.10)$$

e (x_p, y_p) é a localização da junção p em relação a um eixo de coordenadas fixas de referência; h é a profundidade da água; $\Omega = 2\pi/T$ é a frequência de onda; λ é o comprimento da onda; H é a altura da onda; $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda; U_{ow} é a velocidade da corrente na superfície da água, considerado 1% da velocidade do vento a uma altura de 10 m. Usando as Equações (3.7)-(3.10) os termos de força f_1 , f_2 , f_3 e f_4 podem ser obtidos.

Agora, usando as Equações (3.1)-(3.10), as expressões que descrevem o movimento da plataforma sujeita a forças hidrodinâmicas auto-excitadas não lineares podem ser escritas como (Zribi et al., 2004):

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 = -2\xi_1 w_1 \dot{z}_1 - w_1^2 z_1 - \phi_1 K_T (\phi_1 z_1 + \phi_2 z_2) + \phi_1 K_T y \\ \quad - \phi_1 C_T (\phi_1 \dot{z}_1 + \phi_2 \dot{z}_2) + \phi_1 C_T \dot{y} - \phi_1 u + f_1 + f_2 \\ \ddot{z}_2 = -2\xi_2 w_2 \dot{z}_2 - w_2^2 z_2 - \phi_2 K_T (\phi_1 z_1 + \phi_2 z_2) + \phi_2 K_T y \\ \quad - \phi_2 C_T (\phi_1 \dot{z}_1 + \phi_2 \dot{z}_2) + \phi_2 C_T \dot{y} - \phi_2 u + f_3 + f_4 \\ \ddot{y} = -2\xi_T w_T \dot{y} + 2\xi_T w_T (\phi_1 \dot{z}_1 + \phi_2 \dot{z}_2) - w_T^2 y + \\ \quad + w_T^2 (\phi_1 z_1 + \phi_2 z_2) + \frac{1}{m_T} u \end{cases} \quad (3.11)$$

Definindo as seguintes variáveis de estado:

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

O modelo da plataforma da Equação (3.11) pode ser escrito na forma de espaço de estados como segue:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fg(x, t) \quad (3.12)$$

Sendo que:

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

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

Para simulação, os dados da onda são (Zribi et al., 2004; Wu, 2013): $H = 12,19$ m, $h = 76,2$ m, $\lambda = 182,88$ m e $U_{ow} = 0,122$ m/s. A densidade do aço é $7730,7$ kg/m³, a densidade da água é $\rho_w = 1025,6$ kg/m³ e o peso do convés de concreto suportado pela estrutura de aço é 6672300 N. Com estes dados, conjuntamente com os dados das Tabelas 3.1 e 3.2, os parâmetros de força de onda em cada junção da estrutura podem ser calculados.

As frequências naturais dos modos de vibração 1 e 2 são $w_1 = 1,818$ Hz e $w_2 = 10,8683$ Hz, respectivamente. O amortecimento estrutural em cada modo é considerado 0,5%, i.e. $\xi_1 = \xi_2 = 0,005$, e as contribuições das formas modais são $\phi_1 = -0,003445$ e $\phi_2 = 0,00344628$. Os parâmetros do TMD são escolhidos para estar em sintonia com o primeiro modo, tal que $w_T = 1,818$ Hz, $\xi_T = 0,15$, $K_T = 1551,5$ e $C_T = 256$ (Zribi et al., 2004; Wu, 2013).

Usando os valores dos parâmetros do sistema, temos que:

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

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,003443 \\ 0 \\ -0,00344628 \\ 0 \\ 0,00213 \end{bmatrix}$$

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

As Figuras 3.8 e 3.9 mostram a força hidrodinâmica da onda atuando sobre a plataforma e os deslocamentos laterais dos três andares da plataforma (estrutura + TMD), respectivamente, para uma frequência de onda $\Omega = 0,5773$ Hz. As amplitudes das oscilações pico a pico dos três andares são 0,4534 m, 0,4935 m e 0,5214 m, respectivamente.

As Figuras 3.10 e 3.11 mostram a força hidrodinâmica da onda e os deslocamentos laterais da plataforma, para uma frequência de onda $\Omega = 1,8$ Hz, próximo à primeira frequência natural da plataforma. As amplitudes das oscilações pico a pico dos três andares são 1,3691 m, 1,4836 m e 1,5577 m, respectivamente. Como podem ser visualizadas, as amplitudes das oscilações são maiores e, nessas condições, a operação

da plataforma é muito perigosa, sendo necessária a adoção de técnicas de controle ativo para atenuar ou eliminar essas oscilações.

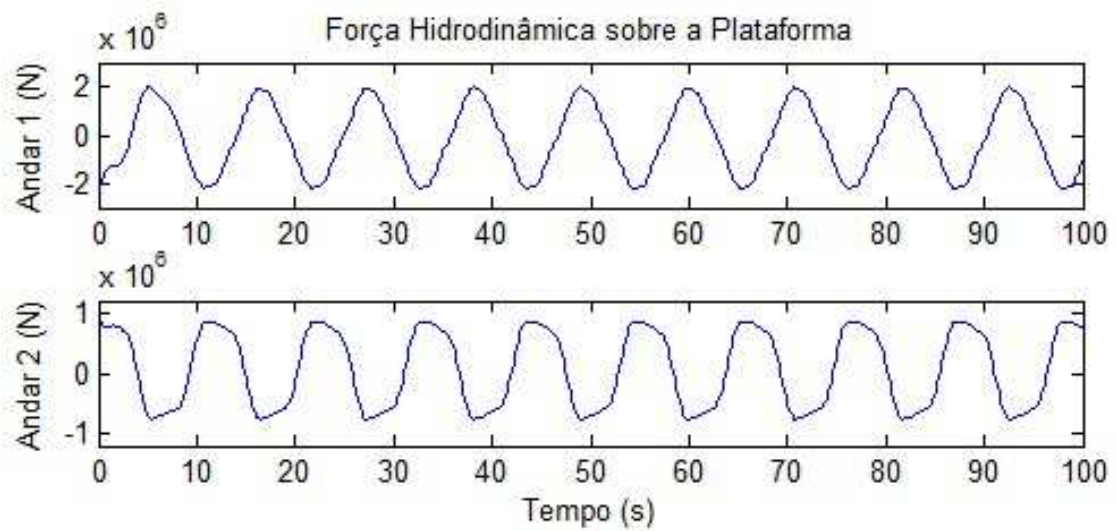


Figura 3.8– Força hidrodinâmica da onda sobre a plataforma para uma frequência de onda $\Omega = 0,5773$ Hz

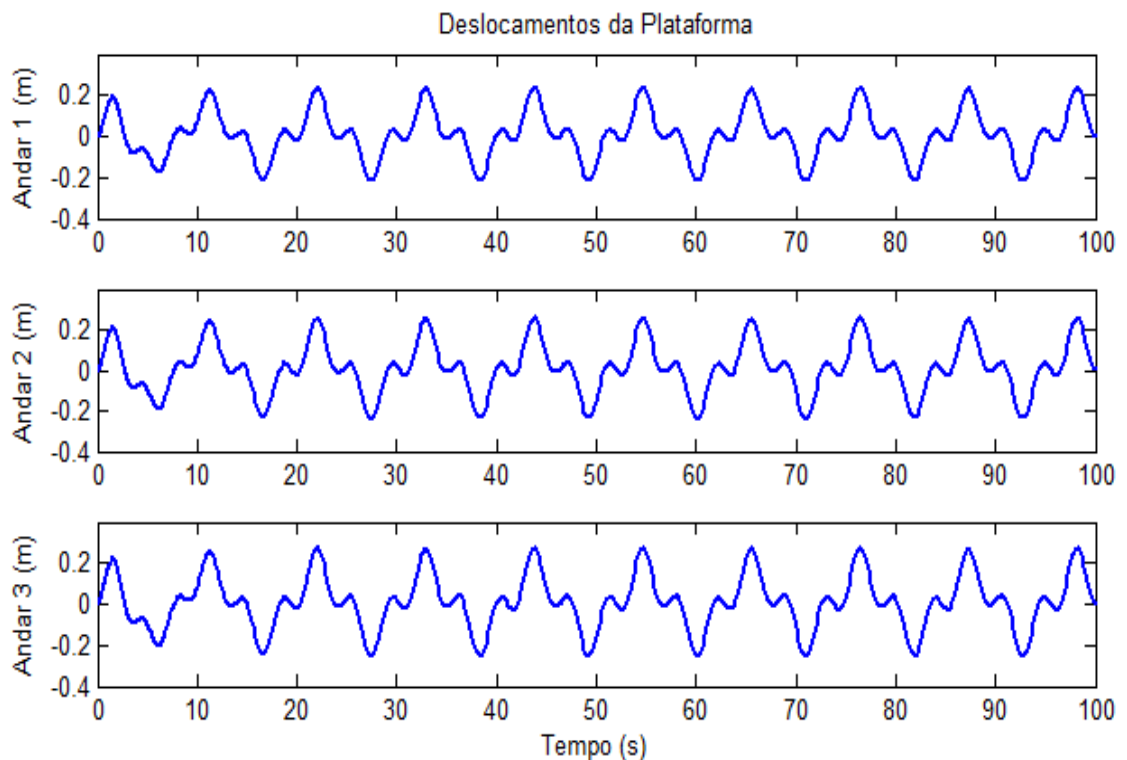


Figura 3.9 – Resposta da plataforma para uma frequência de onda $\Omega = 0,5773$ Hz

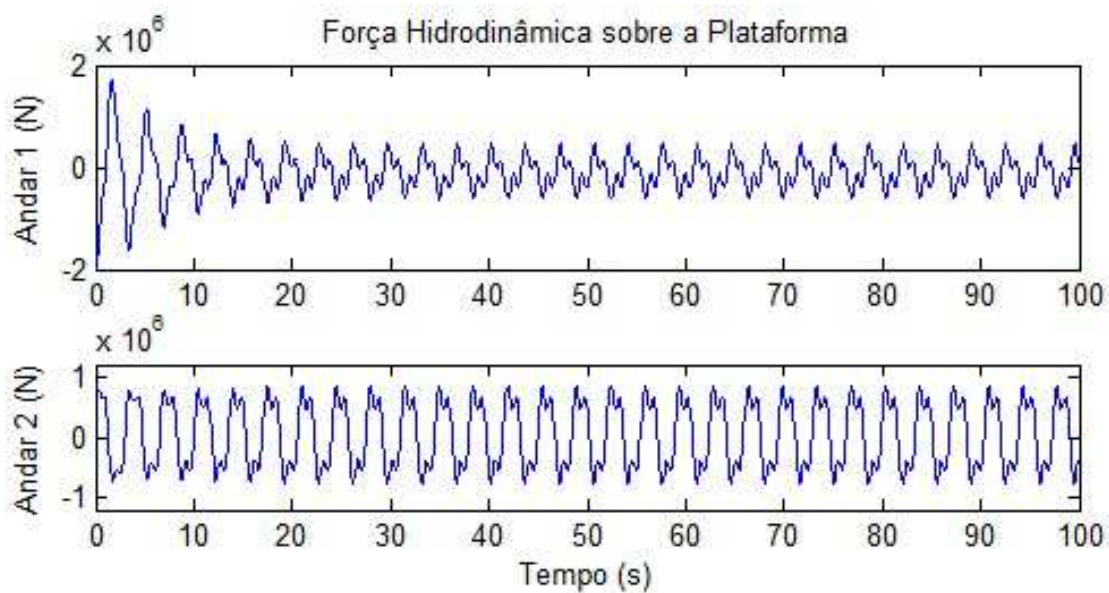


Figura 3.10 – Força hidrodinâmica da onda sobre a plataforma para uma frequência de onda $\Omega = 1,8$ Hz

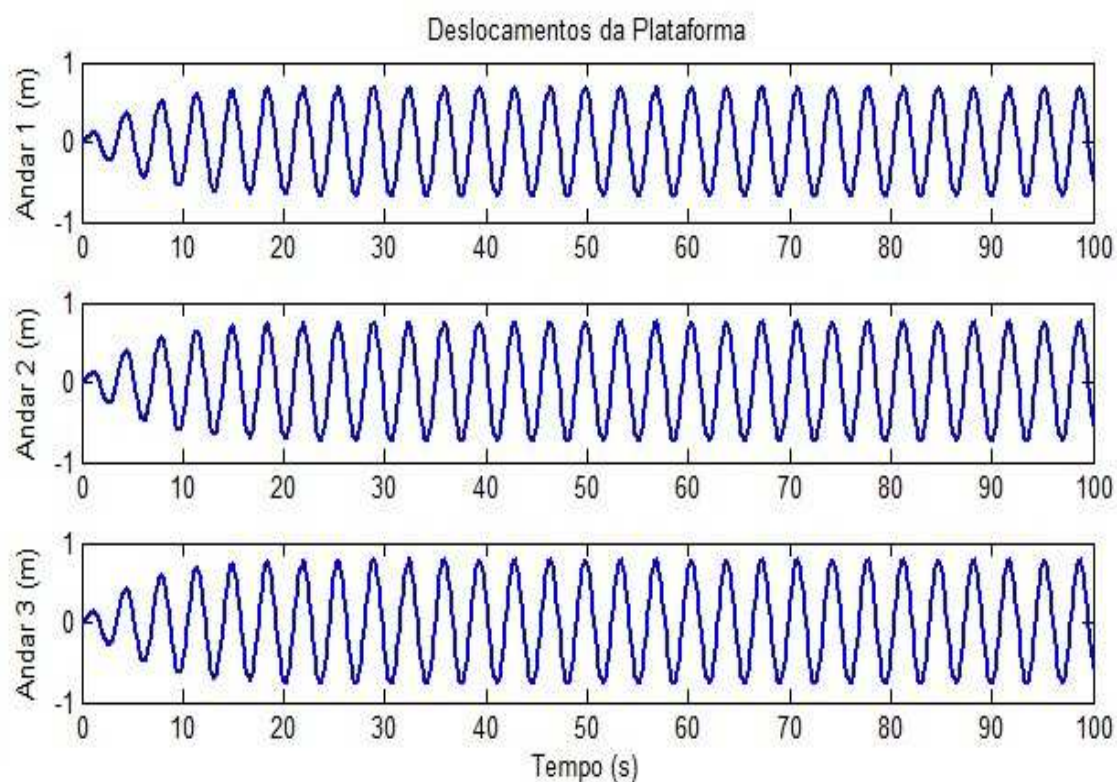


Figura 3.11 – Resposta da plataforma para uma frequência de onda $\Omega = 1,8$ Hz

Capítulo 4

A Transformada de Hilbert-Huang para Detecção de Anomalias em Estruturas

4.1 Introdução

A identificação de parâmetros modais ou análise modal de um sistema estrutural com base em sua resposta de vibração é muito importante em várias aplicações, incluindo a avaliação de condições estruturais, monitoramento da integridade estrutural e controle de vibrações.

A ideia central dos métodos de identificação de parâmetros modais (frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais) baseados em ensaios de vibração é que esses parâmetros dependem das propriedades físicas da estrutura (propriedades elásticas, geometria e densidade do material), as quais se refletem nos parâmetros dinâmicos (massa, amortecimento e rigidez). Portanto, qualquer alteração em uma dessas propriedades físicas (e/ou parâmetros dinâmicos) provoca mudanças nos parâmetros modais, permitindo, dessa forma, a sua identificação.

Os modos de vibração podem ser definidos como uma composição de movimentos independentes entre si, os quais descrevem o comportamento geral de um sistema linear. O perfil de deformação em cada modo representa a forma modal, a frequência de oscilação correspondente a cada modo representa a frequência natural e a medida de dissipação de energia corresponde ao amortecimento modal.

A frequência natural é o parâmetro modal mais importante da estrutura. Portanto, quando ocorre uma fissura (dano) na seção de uma viga, existe uma redução no momento de inércia, que é proporcional a abertura e comprimento da fissura, e uma consequente redução da rigidez à flexão local. Ocorre, portanto, uma diminuição dos valores de frequência natural na flexão. Em outras palavras, com o aumento do

carregamento e a evolução da fissuração, existe uma diminuição da frequência natural e um aumento do amortecimento. Essas alterações refletem as mudanças ocorridas na estrutura interna (aumento das microfissuras no concreto e uma consequente redução do módulo de elasticidade) e também as mudanças na rigidez de elementos estruturais submetidos a carregamento progressivo (redução da seção transversal e do valor da rigidez) (Almeida e Hanai, 2008).

4.2 Alterações de Parâmetros Modais devido a Mudança de Parâmetros Físicos da Estrutura.

A presença de danos ou deterioração em uma estrutura provocam modificações nas propriedades físicas da estrutura. Essas modificações se manifestam como alterações nos parâmetros modais (frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal) que podem ser obtidos a partir dos resultados de testes dinâmicos (vibração). Na literatura, os termos frequências naturais, frequências modais e frequências de ressonância são muitas vezes utilizado. Todos os três se referem ao mesmo item. (Salawu, 1997).

Mudanças nos parâmetros modais não podem ser as mesmas para cada modo, uma vez que as alterações dependem da natureza, localização e gravidade da lesão. Este efeito oferece a possibilidade de utilizar os dados de ensaio dinâmico para detectar, localizar e quantificar os danos. Os resultados dos testes realizados em momentos diferentes oferecem a oportunidade de monitorar alterações na condição estrutural com o tempo. Uma outra vantagem de medir as respostas de vibração é a natureza global das frequências naturais. Essa medição permite escolher pontos de acordo com a situação de teste.

Parâmetros modais podem ter um custo mais barato de serem obtidos a partir das respostas vibratórias da estrutura. As respostas são adquiridas por transdutores que monitoram a resposta estrutural provocada por forças de excitação induzidas artificialmente ou forças ambientais no local de serviço. A entrada de níveis baixos de energia é suficiente para produzir respostas mensuráveis, desde que a entrada de energia seja amplificada dinamicamente.

Os danos estruturais geralmente resultam numa diminuição na massa, rigidez e resistência dos elementos estruturais. (Curadelli et al, 2007). Os métodos de localização de danos mais úteis (com base em ensaio dinâmico) são, provavelmente, aqueles que utilizam mudanças nas frequências de ressonância, porque medições de frequência podem ser rapidamente conduzidas e são muitas vezes confiáveis. Perda anormal de rigidez é inferida quando frequências naturais medidas são substancialmente menores do que as esperadas. Como exemplo, tem-se que a existência de uma rachadura em uma seção de uma viga é equivalente a uma redução (proporcional à gravidade da rachadura) no momento de inércia. Isto leva a uma redução de rigidez da flexão local na seção transversal. As frequências mais elevadas do que as esperadas são indicativos de apoios mais rígidos (hiperestáticos) (Salawu, 1997).

Deve-se notar que as mudanças de frequência têm algumas limitações práticas em muitas aplicações, especialmente no caso de grandes estruturas (Farrar et al, 1994). A detecção de fendas de uma estrutura com base no amortecimento, no entanto, tem vantagens sobre os sistemas de detecção baseado em frequências e formas modais. De fato, as alterações de amortecimento podem levar a detecção de não linearidades, efeitos dissipativos que são produzidos por rachaduras reais, enquanto que pequenas rachaduras geralmente levam a pequenas ou nenhuma variação de frequências.

Ou seja, a análise do amortecimento pode ser vantajosamente utilizada como um identificador de danos porque é mais sensível a danos do que a frequência instantânea.

Uma prova disso são as experiências realizadas por Curadelli (2003), em que ele utilizou um modelo de um oscilador bilinear, uma estrutura de concreto, uma viga e um compartimento de seis andares de alumínio, em que por atuação de três níveis de força foi detectada pouca variação na frequência e uma grande variação no fator de amortecimento.

A Figura 4.1 mostra um esquema de um oscilador não linear que usa um amortecedor, uma mola com deformação elástica e outra mola com deformação elástico-plástica. O oscilador é carregado com três níveis próximos e diferentes de força. A Figura 4.2 mostra o resultado da aplicação dos três níveis de força (curva com traço grosso, curva com traço tracejado e curva com traço fino) no gráfico de frequência natural instantânea versus amplitude instantânea. O gráfico mostra pouca variação entre as frequências instantâneas. Na Figura 4.3 mostra o resultado da aplicação dos três

níveis de força no gráfico do fator de amortecimento instantâneo versus amplitude instantânea. Nesse gráfico é mostrado que o fator de amortecimento é mais sensível a variação de força do que a frequência instantânea.

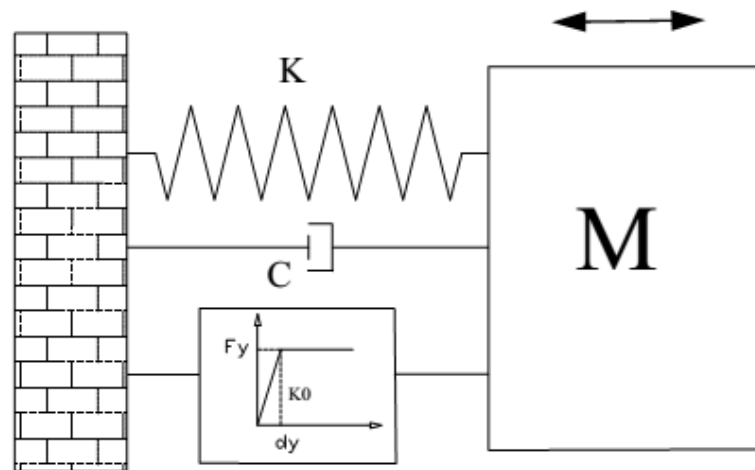


Figura 4.1 – Oscilador bilinear (Curadelli, 2003)

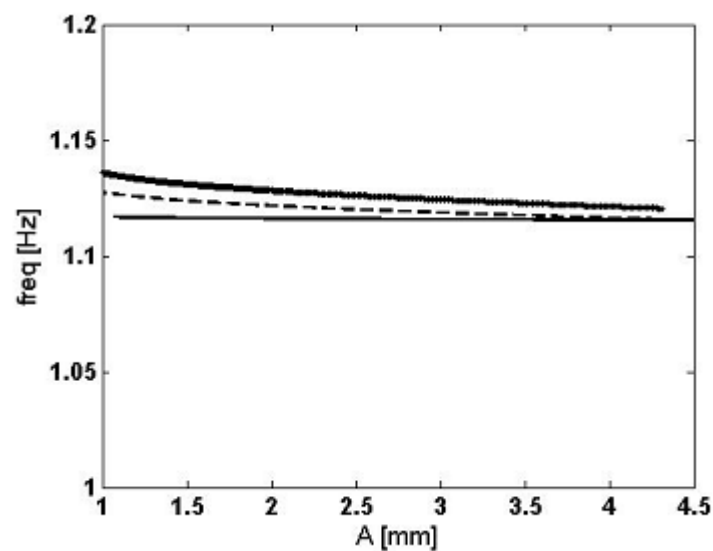


Figura 4.2 – Frequência natural instantânea versus amplitude instantânea para as três forças aplicadas no oscilador (Curadelli, 2003)

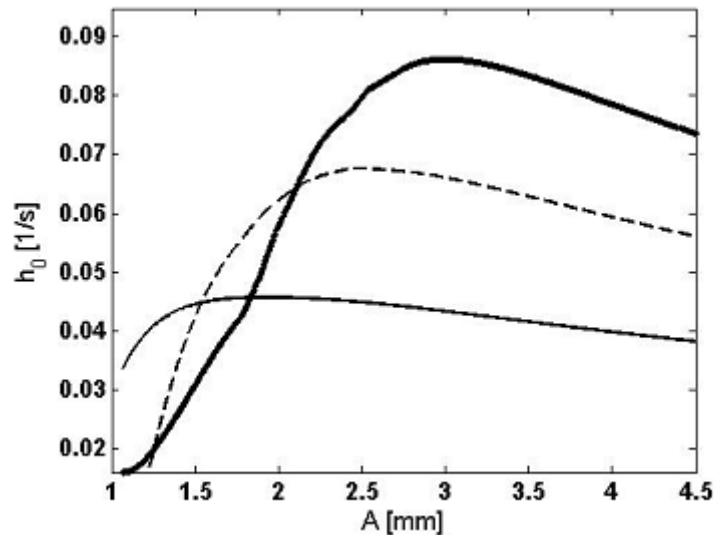


Figura 4.3 – Fator de amortecimento instantâneo versus amplitude instantânea para as três forças aplicadas no oscilador (Curadelli, 2003)

4.3 Monitoramento Estrutural de Plataformas

A condição estrutural e o desempenho são muito importante para a segurança das plataformas *offshore*, devido ao ambiente hostil onde essas plataformas operam. A avaliação estrutural de uma plataforma *offshore* pode ser conduzida baseada no manual API RP 2SIM (API, 2009). Esse protocolo começa com a coleta de dados para a avaliação da integridade estrutural, fundamental para uma inspeção global e uma manutenção estratégica.

A avaliação de integridade estrutural é muito importante para encontrar danos em potencial. Geralmente uma inspeção visual e outros métodos locais são caminhos tradicionais para o monitoramento de danos em potencial. Porém, há uma necessidade clara para desenvolver novas aproximações e técnicas para o monitoramento da condição estrutural e desempenho de plataformas *offshore*. Uma razão é o aumento da profundidade da água na exploração de petróleo *offshore*, o que torna cada vez mais difícil o desempenho da inspeção visual para detectar os perigos na estrutura. Outra razão é a pouca confiança e o alto custo da inspeção visual que esse método comum traz. Além disso, mais e mais plataformas *offshore* estão sendo projetadas ao redor do mundo. Todos esses problemas conduzem para o desenvolvimento de técnicas de monitoramento para a avaliação da segurança da estrutura.

Um problema chave para o monitoramento da integridade de uma estrutura é a extração dos sinais de vibração. Devido às características das cargas do ambiente marinho ou dos perigos estruturais nesse ambiente, os sinais coletados das plataformas *offshore* são ordinariamente não-estacionários e não-lineares. Dessa forma, deve-se utilizar um método que leve em consideração as peculiaridades desse ambiente hostil (Wang et al, 2012).

4.4 Métodos Usuais de Análise de Dados

4.4.1 Análise Espectral de Fourier

A análise espectral de Fourier vem sendo muito utilizada nos últimos 50 anos para estudar vários tipos de sinais. Parâmetros frequentemente empregados em projetos de engenharia, como período de pico e amplitude significativa do sinal estão relacionados a momentos do espectro de energia.

Apesar da sua ampla utilização e de ser válida para diversas situações, a transformada de Fourier tem algumas limitações. Para a representação de uma série temporal $X(t)$ através de uma expansão em série de Fourier, conforme a equação 4.1, é necessário que o sistema seja linear e estacionário. Por ser um método que trata das características globais das séries (decomposição da série em senos e cossenos com fases constantes ao longo de toda a série), fica impossível obter informações relacionadas com a não estacionariedade de um determinado processo.

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad (4.1)$$

Em que $a_0, a_1, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n$ são os coeficientes de Fourier, T é o período fundamental e t é o tempo (Neves, 2012).

4.4.2 Técnica Wavelet (Ondaleta)

Liu (2000, 2001) utilizou o método de Wavelet para o estudo de grupo de ondas. A técnica é baseada na aplicação de funções ondaleta (FO), $\Psi_{j,k}(t)$ na Equação (4.2) sobre a série temporal $X(t)$, sendo que $W_{j,k}(t)$ na Equação (4.3), representa a similaridade da função $X(t)$ com cada FO. Quanto maior o valor $W_{j,k}(t)$ maior será a similaridade de $X(t)$ com a função ondaleta-mãe que modula o sinal analisado.

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \Psi_0\left(\frac{t-k}{j}\right); j \neq 0 \quad (4.2)$$

$$W_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{j}} \int_{t=1}^N X(t) \Psi_0^*\left(\frac{t-k}{j}\right) dt \quad (4.3)$$

Cada função Wavelet possui um termo de escalonamento j , o qual determina sua contração ou dilatação, e um termo de translação k , o qual indica quantas vezes cada FO é aplicada sobre a série temporal.

Apesar da técnica da Wavelet resolver em parte o problema da análise de processos não estacionários, processos não lineares não são bem representados. Além disso, o método baseia-se em funções matemáticas pré-definidas ($\Psi_{j,k}(t)$), o que pode gerar interpretações equivocadas sobre a série temporal (Neves, 2012).

4.4.3 Transformada de Hilbert-Huang

A Transformada de Hilbert-Huang (HHT) foi desenvolvida por Huang et al. (1996, 1998 e 1999) com o objetivo de analisar processos não lineares e não estacionários. A HHT consiste numa decomposição em modos oscilatórios empíricos (EMD – “Empirical Mode Decomposition”) do registro temporal para obter funções intrínsecas ao sistema (IMF – “Intrinsic Mode Function”) seguida da aplicação da transformada de Hilbert às IMF. Esta técnica fornece informações sobre as frequências e amplitudes instantâneas de cada IMF ao longo do tempo, ao contrário da análise de Fourier que fornece informações sobre a série global. O conjunto das frequências e amplitudes instantâneas, para todas as IMF, gera o espectro de Hilbert, o qual permite identificar processos não estacionários e não lineares (Neves, 2012).

A HHT difere dos outros dois métodos apresentados por se basear em um método adaptativo de decomposição (EMD), baseado nas características de cada sinal, sem impor características matemáticas pré-definidas (auto-funções) à série temporal. A EMD supõe que qualquer conjunto de dados possa ser separado em um conjunto finito de funções intrínsecas simples (IMFs), cada uma satisfazendo duas características básicas:

- ✓ Ser uma oscilação simples com o mesmo número de extremos e cruzamentos de zero (pode existir uma diferença de um entre extremos e cruzamentos de zeros);
- ✓ A média entre um valor de máximo e seu respectivo valor de mínimo deve ser zero.

O método de decomposição consiste nos seguintes passos:

1. Localizar os máximos e mínimos da série temporal e determinar uma envoltória através de uma interpolação por um “spline” cúbico entre os valores máximos e outra interpolação entre os valores mínimos, ou seja, $e_+(t)$ que representa a envoltória superior dos dados $X(t)$ e $e_-(t)$ que representa a envoltória inferior dos dados $X(t)$, como ilustração, veja a Figura 4.4.

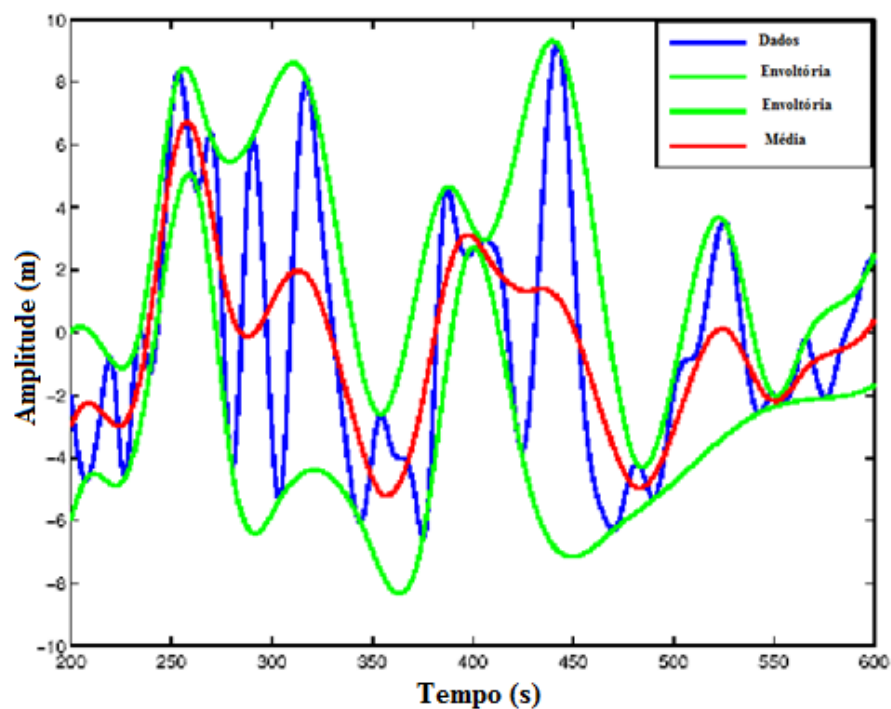


Figura 4.4 – Envoltórias no sinal (Neves, 2012)

2. Determinar a média $m_1(t)$, ponto a ponto, entre as duas envoltórias.

$$m_1(t) = \frac{e_+(t) + e_-(t)}{2} \quad (4.4)$$

Caso esta série média tenha as características de uma IMF, ela é armazenada e posteriormente subtraída do registro temporal, conforme Equação (4.5), e o processo de obtenção da IMF é iniciado novamente nesse novo registro (h_i).

$$h_1 = X(t) - m_1(t) \quad (4.5)$$

em que $X(t)$ é a série temporal, $m_1(t)$ é a série média e h_1 é a série restante.

Caso a série média não tenha as características básicas de uma IMF, o método é repetido até obter-se a IMF. Ou seja:

$$h_{ik} = h_{i(k-1)} - m_{1k}(t) \quad (4.6)$$

O índice k é um contador que representa a repetição do processo até se obter uma IMF. Esta iteração recebe o nome de peneiramento (“sifting”). A determinação de IMFs está associada a um critério de convergência. Em algum momento, o processo de peneiramento é interrompido e o resultado é um conjunto de IMFs, somatório dos $c_i(t)$ e mais algum resíduo $r(t)$ (Neves, 2012). Depois da decomposição, o sinal original $X(t)$ pode ser representado por:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (4.7)$$

A Integral de Hilbert

A transformada de Hilbert, e sua inversa, denota a parte real e imaginária de uma função complexa definida no eixo real. A relação dada por esta operação é facilmente obtida pela aplicação do Teorema da Integral de Cauchy para uma função $f(z)$ definida no plano superior, acima do eixo real, e com decaimento para zero no infinito (Tolwinski, 2007). Considere o contorno retratado na Figura 4.5. Para um ponto z^* dentro do contorno, o Teorema de Cauchy é dado por:

$$f(z^*) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{f(z)}{z - z^*} dz \quad (4.8)$$

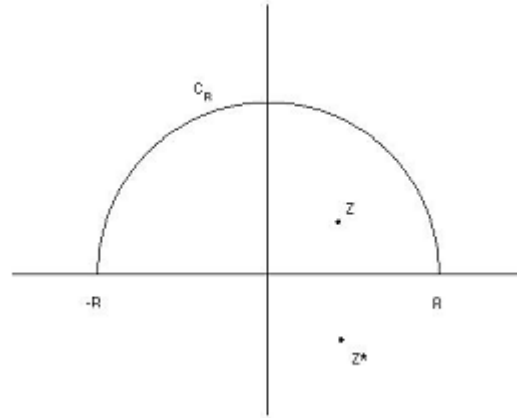


Figura 4.5 – Contorno da integral (Tolwinski, 2007)

Escrevendo z^* como a soma das partes real e imaginária, e a integral como a soma de integrais ao longo do semicírculo de raio R no intervalo real $[-R, R]$, o Teorema de Cauchy torna-se:

$$f(z^*) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-R}^R \frac{f(z)}{(x - x^*) - iy^*} dx + \frac{1}{2\pi i} \int_{C_R} \frac{f(z)}{(x - x^*) + i(y - y^*)} dz \quad (4.9)$$

Com $R \rightarrow \infty$, o segundo termo desaparece. Agora, substituindo z^* pelo seu conjugado na Equação (4.9), o resultado é zero uma vez que o polo criado $\bar{z}^*$ não está contido dentro do contorno. Então, pode-se adicionar um termo para o integrando, sem nenhum problema. Assim tem-se:

$$f(z^*) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(z)}{(x - x^*) - iy^*} + \frac{f(z)}{(x - x^*) + iy^*} dx \quad (4.10)$$

Reescrevendo $f(z)$ como a soma de seus componentes real e imaginário, $f(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$, e toma-se $y^* = 0$, desde que $u(x, y)$ e $v(x, y)$ estejam no eixo real. Para $u(x, 0)$, $v(x, 0)$ integráveis e diferenciáveis em R , tem-se:

$$f(x^*) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(x, y) + iv(x, y)}{(x - x^*) - iy^*} + \frac{u(x, y) + iv(x, y)}{(x - x^*) + iy^*} dx \quad (4.11)$$

$$f(x^*) = \frac{1}{\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(u(x, y) + iv(x, y))(x - x^*)}{(x - x^*)^2 + y^{*2}} dx \quad (4.12)$$

$$f(x^*) = \frac{1}{\pi i} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(x, 0) + iv(x, 0)}{(x - x^*)} dx \quad (4.13)$$

em que P.V. é o Valor Principal de Cauchy. Assim,

$$u(x^*, 0) + iv(x^*, 0) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v(x, 0)}{(x - x^*)} dx - \frac{i}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(x, 0)}{(x - x^*)} dx \quad (4.14)$$

Identificando a parte real e a parte imaginária, tem-se:

$$u(x^*, 0) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{v(x, 0)}{(x - x^*)} dx \quad (4.15)$$

$$v(x^*, 0) = - \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(x, 0)}{(x - x^*)} dx \quad (4.16)$$

Este último resultado mostra que, no eixo real, basta especificar o componente real de uma função analítica para determinar exclusivamente sua parte imaginária, e vice-versa. Note-se que, devido à singularidade de x^* , a integral é definida no sentido de valores principais. Assim, a identidade é bem definida para funções que são integráveis e diferenciáveis (Tolwinski, 2007).

Portanto, a Transformada de Hilbert é formulada como:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4.17)$$

Um sinal complexo cuja parte imaginária é a transformada de Hilbert da parte real é chamado de sinal analítico. Assim, temos que (Tolwinski, 2007):

$$Z_i(t) = c_i(t) + iH[c_i(t)] = A_i(t)e^{-i\phi_i(t)} \quad (4.18)$$

Da Equação (4.18), temos que a amplitude instantânea e o ângulo de fase são dados por:

$$A_i(t) = \sqrt{c_i(t)^2 + H[c_i(t)]^2} \quad (4.19)$$

$$\phi_i(t) = \arctan \left[\frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)} \right] \quad (4.20)$$

Sendo a frequência instantânea definida como (Huang, 1998):

$$w_i(t) = \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (4.21)$$

4.5 Identificação de Parâmetros Modais usando a HHT

A transformada de Hilbert-Huang é um método efetivo para estudar as características dinâmicas de uma estrutura. Geralmente, a resposta de vibração de uma estrutura pode ser considerada como uma combinação de respostas modais. Isso mostra que toda resposta modal tem por base as IMFs (Huang,1998). Para uma estrutura com múltiplos graus de liberdade sob vibração livre, o método EMD revela, portanto, um conjunto de respostas modais. Desde que cada IMF contenha somente um componente de frequência, a transformada de Hilbert pode ser aplicada para identificar as características dinâmicas para cada resposta modal.

Para uma estrutura linear com um grau de liberdade, a resposta vibracional livre, devido à carga de um impulso, pode ser expressa por:

$$X(t) = A_0 e^{-\xi \omega_n t} \cos(w_d t + \phi_0) \quad (4.22)$$

em que ω_n , w_d e ξ são a frequência natural, frequência natural amortecida e fator de amortecimento, respectivamente. A_0 é a resposta da amplitude.

O sinal analítico de $X(t)$ é dado por:

$$Z(t) = X(t) + iH[X(t)] = A(t)e^{-i\phi(t)} \quad (4.23)$$

Em que $H[X(t)]$ é a transformada de Hilbert de $X(t)$. Para uma estrutura em geral, o fator de amortecimento é pequeno e a frequência natural é grande, a amplitude e o ângulo de fase podem ser dados por:

$$A(t) = A_0 e^{-\xi \omega_n t} \quad (4.24)$$

$$\theta(t) = w_d t + \phi_0 \quad (4.25)$$

Da Equação (4.24) pode-se obter:

$$\ln A(t) = -\xi w_n t + \ln A_0 \quad (4.26)$$

Agora, da Equação (4.21):

$$w(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} = w_d \quad (4.27)$$

em que:

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.28)$$

Denota-se:

$$b = -\xi w_n \quad (4.29)$$

$$d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.30)$$

4.6 Aplicação em um Sistema com um Grau de Liberdade (SDOF)

Considere um sistema vibracional linear e invariante no tempo, com um único grau de liberdade, composto de um corpo de massa m ligado por uma mola e um amortecedor viscoso a um suporte fixo, com uma força $F(t)$ de frequência ω e amplitude f_e atuando sobre ela, como apresentado na Figura 4.6 (Tannus, 2013).

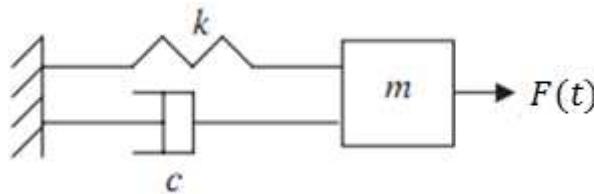


Figura 4.6 – Sistema SDOF

A equação do movimento desse sistema é dada por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (4.31)$$

sendo que x = deslocamento da massa m

$\dot{x}$ = velocidade da massa m

$\ddot{x}$ = aceleração da massa m

c = amortecimento

k = rigidez

$F(t)$ = força de excitação

Assuma que a força de excitação é uma função seno pura, da forma:

$$F(t) = f_e \cos \omega t \quad (4.32)$$

Substituindo a Equação (4.30) em (4.29), e expressando-a em termos de frequência natural ω_n e taxa de amortecimento ξ , obtêm-se:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = f \cos \omega t \quad (4.33)$$

sendo que

$$f = f_e/m$$
$$\omega_n^2 = k/m$$
$$\xi = c/\sqrt{mk}$$

É assumido um sistema subamortecido, ou seja, $0 < \xi < 1$.

Identificação por Resposta Livre

A resposta livre do sistema descrito pela Equação (4.31) é dada por:

$$x(t) = A_0 e^{-\xi\omega_n t} \cos(\omega_d t - \phi_0) \quad (4.34)$$

sendo que $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$

A_0 e ϕ_0 dependem da condição inicial, e ω_d é a frequência natural amortecida. Para efeitos de simulação, considera-se o sistema SDOF, com as características $m = 1$ kg, $c = 0.7$ Ns/m e $k = 7000$ N/m. Com esses valores, os parâmetros modais analíticos (de projeto) são: $\omega_n = 13,32$ Hz e $\xi = 0,00419$ e A resposta livre do sistema, ou resposta ao impulso, pode ser observada na Figura 4.7.

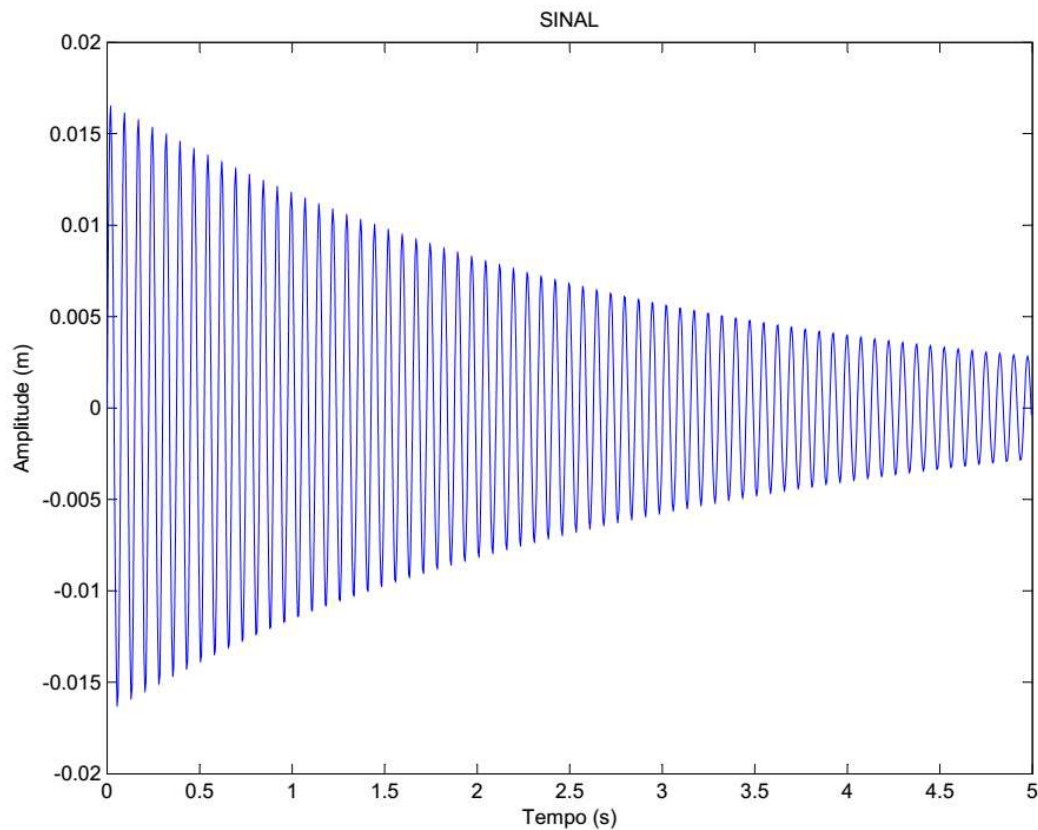


Figura 4.7 – Resposta livre do sistema SDOF

A seguir, aplica-se a EMD no sinal de resposta livre para encontrar as IMFs do sistema, bem como o espectro de frequência via a Transformada de Hilbert, as quais são mostradas nas Figuras 4.8 e 4.9 respectivamente.

Da Figura 4.8, pode-se ver que a IMF1 contribui dominantemente para o sinal original. No gráfico do espectro de frequência da Figura 4.9, pode-se notar também que a maior frequência instantânea ocorre em relação a IMF1. Esse fenômeno pode ser verificado no espectro da Figura 4.10, que mostra a frequência instantânea da transformada de Hilbert referente à IMF1, a qual permanece praticamente constante em todo o domínio do tempo.

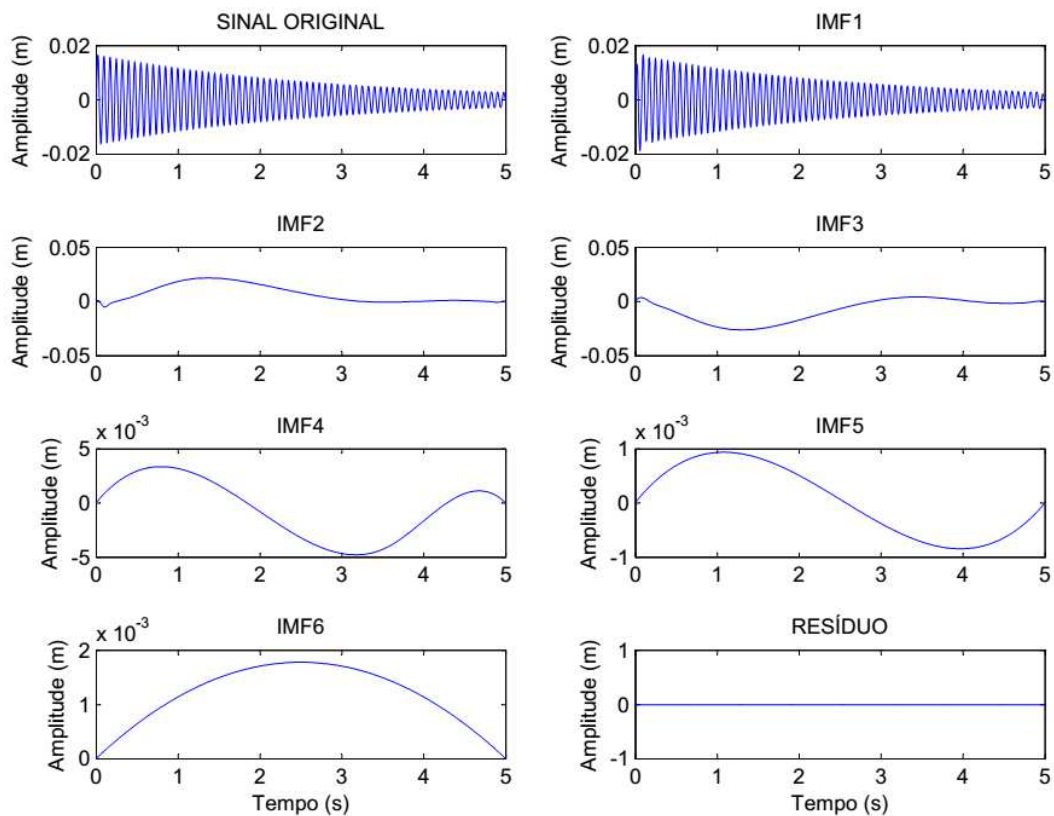


Figura 4.8 – IMFs do sinal

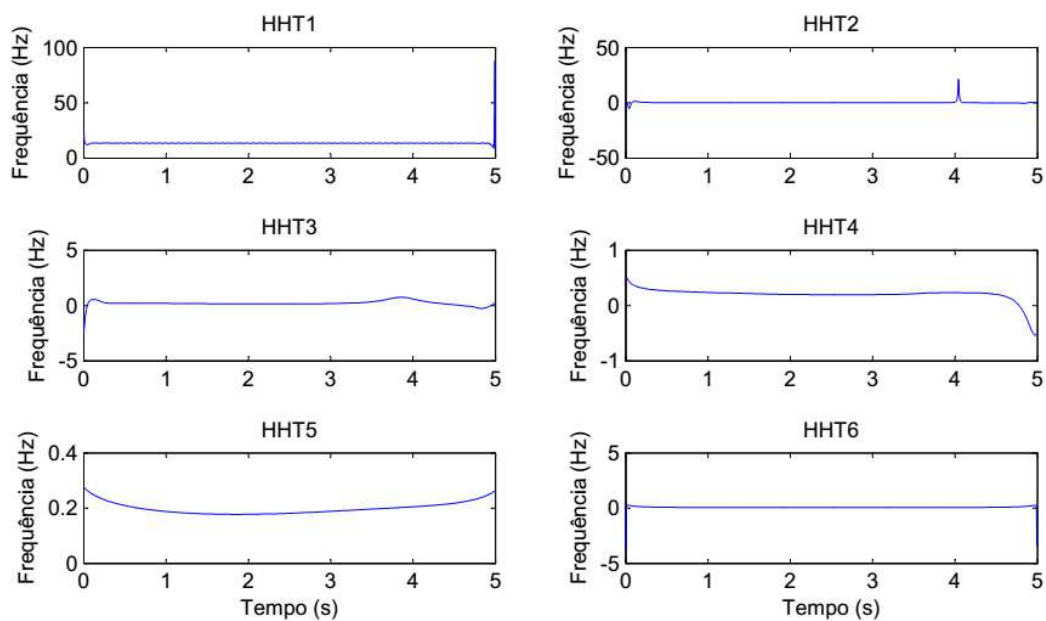


Figura 4.9 – Transformada de Hilbert de cada IMF

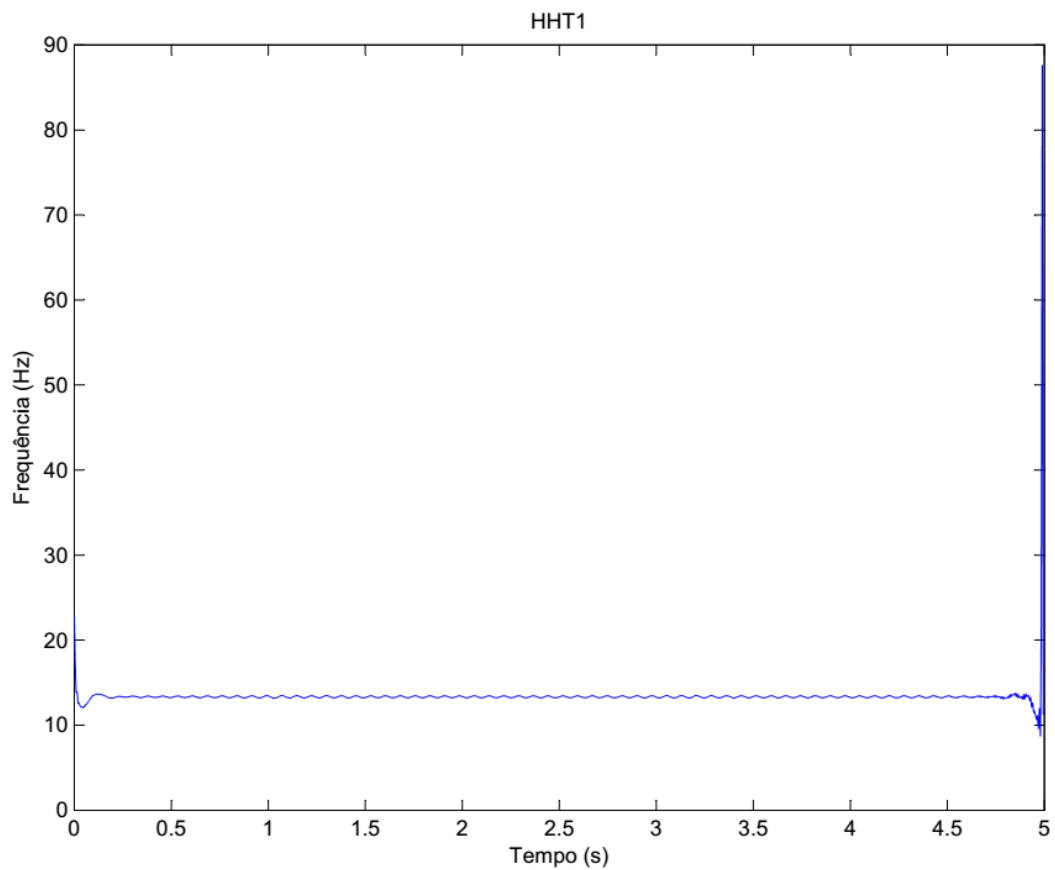


Figura 4.10 – Gráfico ampliado da HHT1

Na Figura 4.11 mostra-se o Espectro de frequência de Fourier para todas as IMFs. Já na Figura 4.12 mostra-se o Espectro para a IMF1. Como o sistema é linear e simples o espectro mostra que a frequência fundamental do sistema é 13,28 Hz. Esse espectro serve como mais um parâmetro de comparação para a frequência.

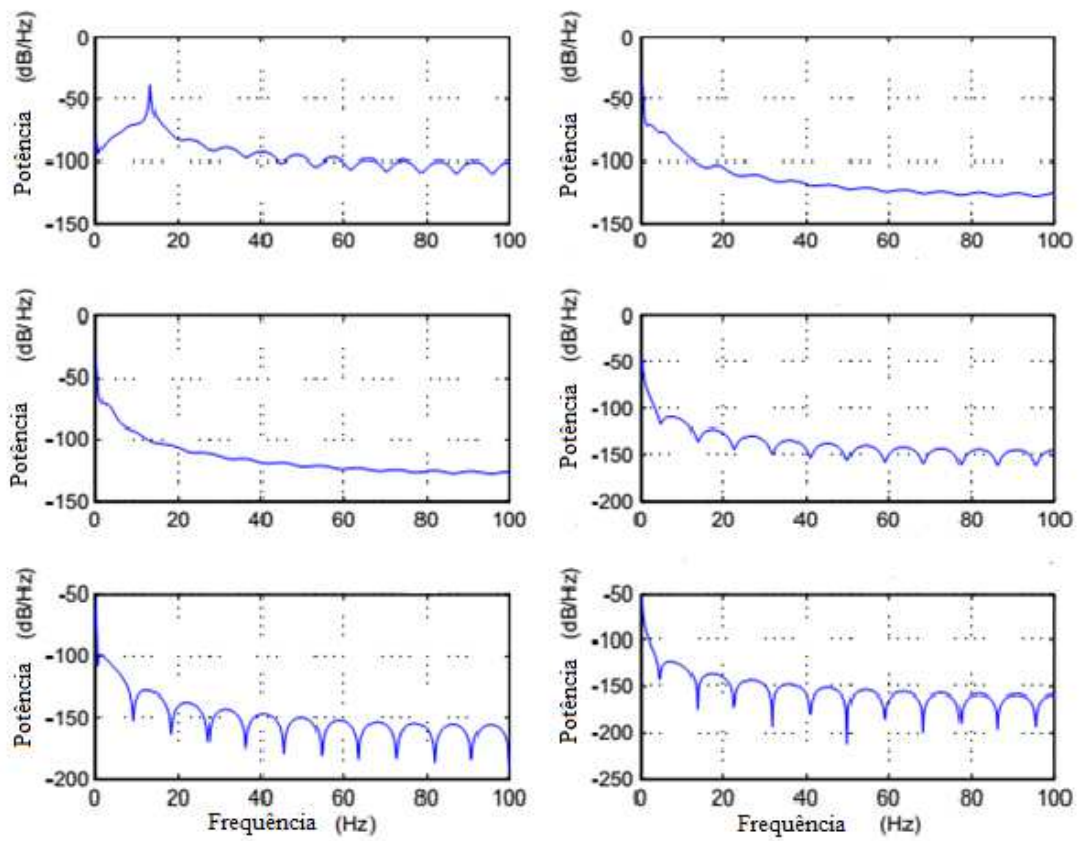


Figura 4.11 – Espectro de frequência de Fourier

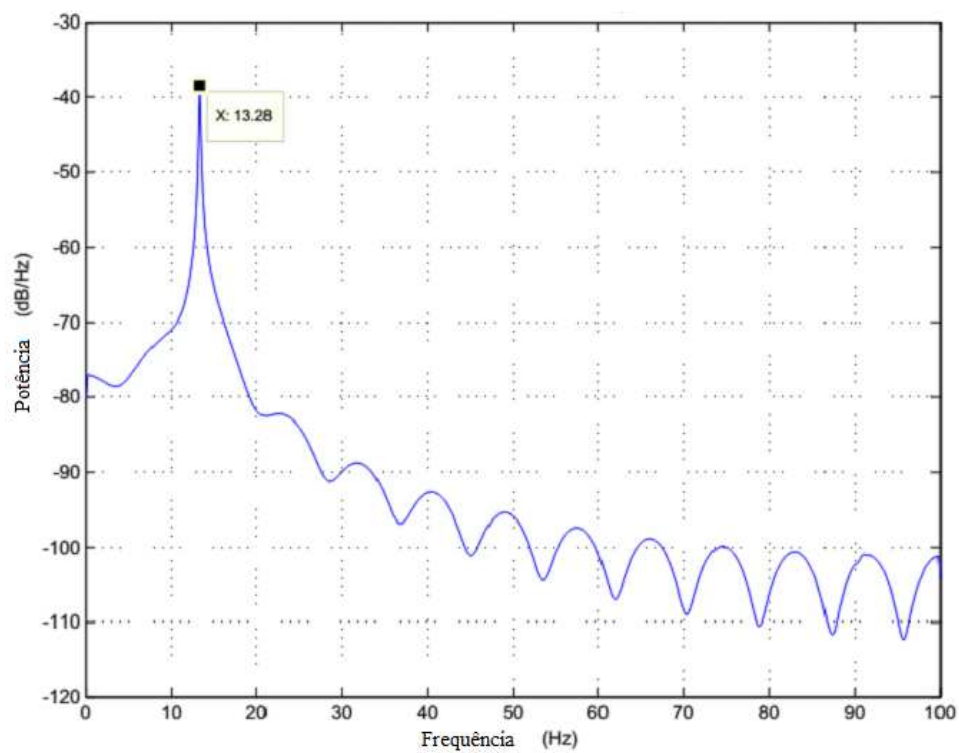


Figura 4.12 – Espectro de frequência de Fourier referente a IMF1

Para o cálculo da frequência modal ω_n e da relação de amortecimento modal ξ , é necessário plotar o logaritmo natural da amplitude da transformada de Hilbert versus tempo, bem como plotar o ângulo de fase versus tempo, conforme mostrados na Figura 4.13 e 4.14 respectivamente. Com os gráficos plotados retira-se o coeficiente angular de cada uma e compara-se com os coeficientes angulares das Equações (4.29) e (4.30).

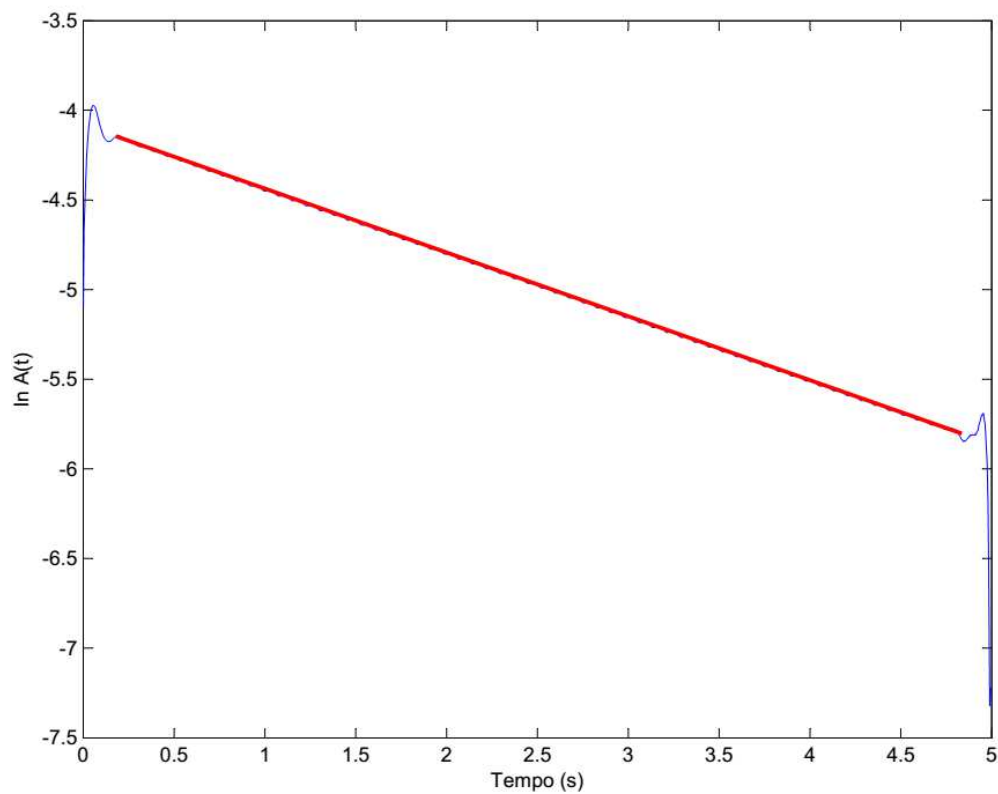


Figura 4.13 – Logaritmo da amplitude versus tempo

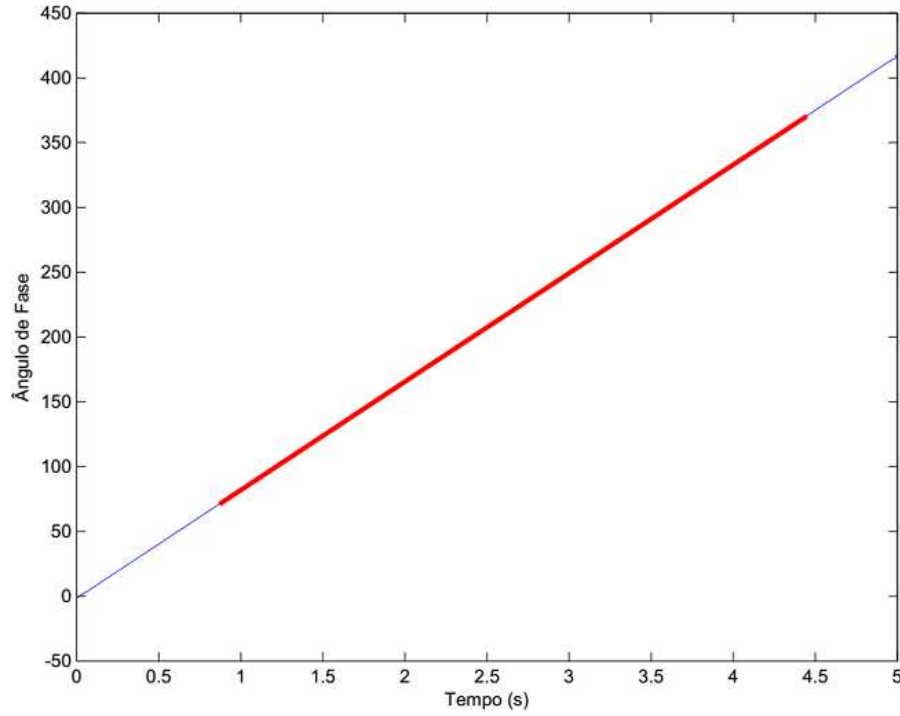


Figura 4.14 – Ângulo de fase versus tempo

Pode ser observado que para uma faixa de valores de t o gráfico se aproxima muito de uma reta, tanto para o módulo quanto para a fase. Nesse caso, adota-se de 1 a 2 na faixa do tempo. Dentro desse intervalo é traçada uma reta (reta vermelha no gráfico), tomada pelo método dos mínimos quadrados, sendo os parâmetros estimados a partir da inclinação dela. Portanto, as inclinações das retas dos gráficos serão Figura 4.13 e 4.14, serão:

$$b = \text{inclinação}_{\logaritmo} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{-4.802 - (-4.451)}{2 - 1} = -0,351$$

$$d = \text{inclinação}_{\text{fase}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{165,790 - 80,100}{2 - 1} = 83,69$$

Foi possível uma precisão nos valores de Δy pela aproximação aplicada no gráfico. Para estimar o fator de amortecimento e a frequência natural, Equações (4.29) e (4.30). Assim:

$$-0,351 = -\xi \omega_n \quad e \quad 83,69 = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

Resolvendo o sistema, chega-se ao resultado de $\hat{\xi} = 0.00419$ e $\hat{\omega}_n = 83,69 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 13,32 \text{ Hz}$. Na Tabela 4.1, pode ser vista a comparação dos valores

estimados via HHT e de projeto do fator de amortecimento e da frequência natural do sistema.

Resposta	ω_n (Hz)	$\hat{\omega}_n$ (Hz)	ξ	$\hat{\xi}$
Livre	13,32	13,32	0.00418	0.00419

Tabela 4.1: Resultados da simulação para o exemplo SDOF.

Os resultados da Tabela 4.1 mostram que os valores reais e estimados são praticamente os mesmos, qualificando a HHT como uma boa ferramenta para a extração de parâmetros modais. Como uma análise adicional, a Figura 4.7 mostra que a HHT1 possui uma frequência de 13,32 Hz praticamente em toda a sua extensão. Já, fazendo-se um *zoom* dessa figura, mostrado na Figura 4.15, pode-se ver que o resultado apresenta uma forma senoidal, com frequência média pico a pico de 13,32 Hz.

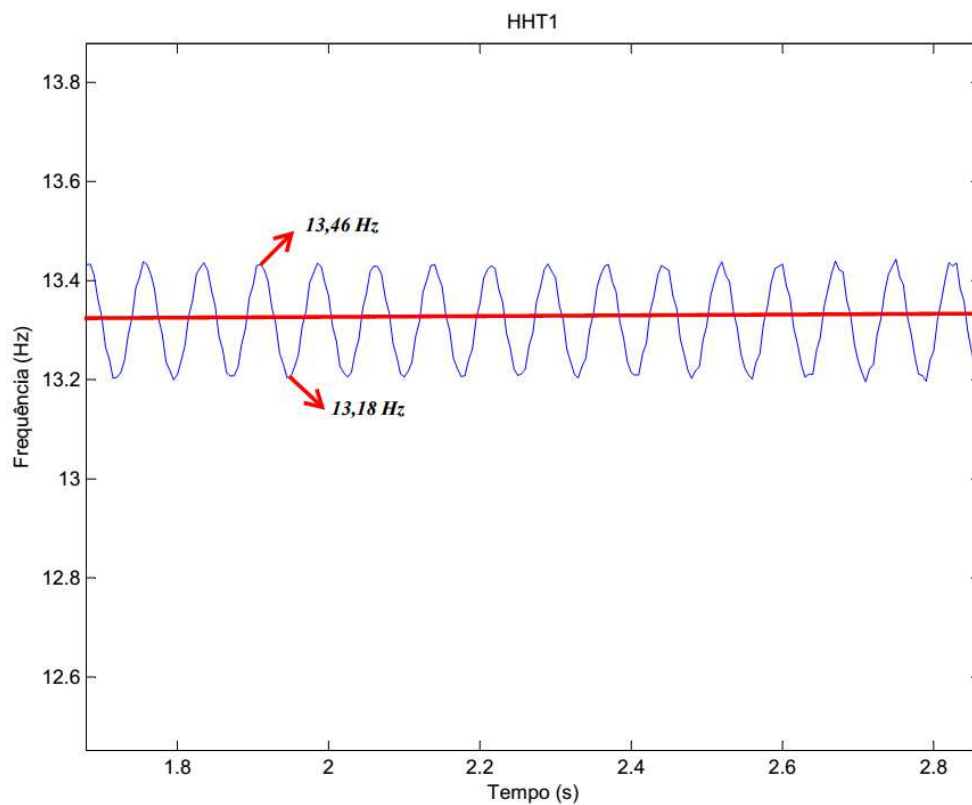


Figura 4.15 – Média da frequência de pico a pico

Pelo Espectro de Fourier encontra-se uma frequência de 13,28 Hz. Comprova-se a coerência dos resultados pelos diferentes métodos utilizados. A frequência encontrada pelo espectro de Fourier está dentro dos resultados da HHT, pois a HHT dá uma frequência instantânea por tempo. O resultado de 13,32 Hz é um resultado médio encontrado utilizando o gráfico de logaritmo e o gráfico de fase do sistema. O resultado da análise de HHT demonstra que o sistema possui uma pequena variação na frequência instantânea fundamental. Isso é um bom resultado (Wang et al, 2012). Pode-se notar que o fator de amortecimento praticamente é o mesmo, confirmando um fator de 4,1%. Por ser o fator de amortecimento mais sensível a mudanças (Curadelli, 2003), esse resultado comprova o desempenho da técnica. Esse exemplo revela como a HHT é uma poderosa ferramenta na identificação de parâmetros modais em uma estrutura ou equipamento.

Capítulo 5

Aplicações e Resultados da HHT no Modelo da Plataforma *Offshore*

5.1 Introdução

Neste capítulo a Transformada de Hilbert-Huang (HHT) é aplicada para a detecção dos parâmetros modais no modelo de plataforma *offshore*, definida no Capítulo 3, sujeita a perturbações persistentes de forças hidrodinâmicas não lineares. Estas forças hidrodinâmicas na forma de ondas e correntes marinhas transfere energia ao sistema, manifestando-se através de vibrações, sendo possível a obtenção das respostas dos modos envolvidos e, através delas, os parâmetros modais correspondentes. O trabalho desenvolvido neste capítulo segue o procedimento da aplicação da HHT no sistema massa mola apresentado no capítulo anterior. As simulações e seus respectivos resultados serão apresentados e discutidos.

5.2 Determinação do Sinal de Vibração

A vantagem do uso de técnicas no domínio da frequência, como a HHT, é que só é necessária a análise do sinal num determinado modo de vibração para extrair os parâmetros modais de toda a estrutura.

Para o estudo do presente caso considera-se o sinal da resposta do primeiro modo de vibração da plataforma induzida por perturbações hidrodinâmicas na frequência de onda $\Omega = 0,5773$ Hz, conforme apresentado na Figura 3.11 e a qual é reproduzida na Figura 5.1.

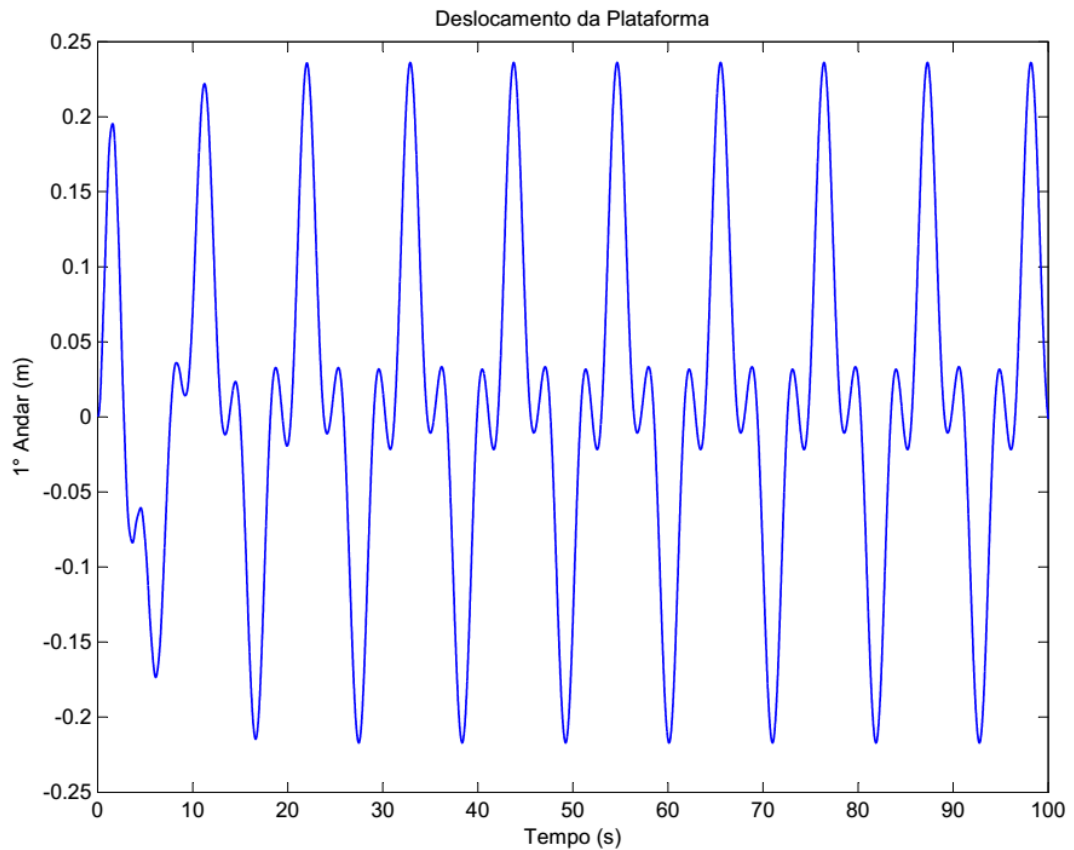


Figura 5.1 – Deslocamento do 1º modo da plataforma *offshore*, para uma frequência de onda de $\Omega = 0,5773$ Hz

5.3 Análise do 1º Modo

Como é de conhecimento, as frequências naturais dos dois primeiros modos de vibração são $w_1 = 1,818$ Hz e $w_2 = 10,8683$ Hz, respectivamente. A análise do Espectro de Fourier do sinal da Figura 5.1 delata um valor aproximado da frequência do primeiro modo de vibração, que é a frequência dominante, mas não a frequência do segundo modo, como ilustrado na Figura 5.2.

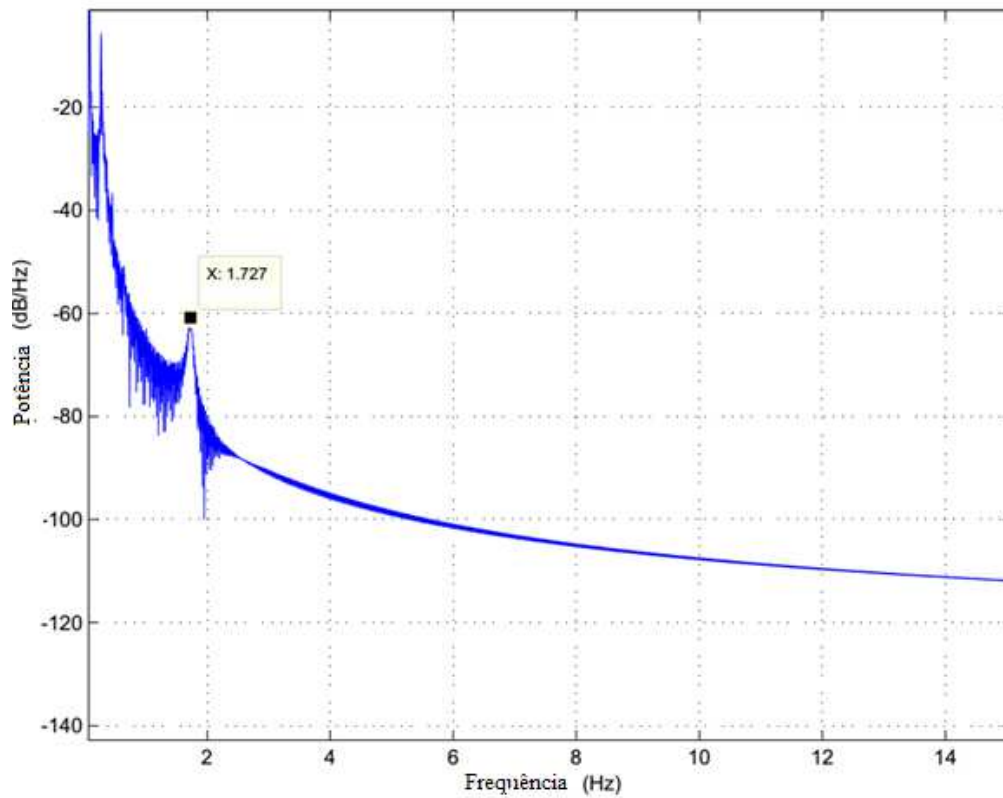


Figura 5.2 – Espectro de Fourier

Para extrair os parâmetros modais do primeiro modo de vibração usando a técnica HHT, o sinal vibratório do 1º modo da Figura 5.1 é usado um filtro passa-faixa entre as frequências de 1,50 Hz e 2,10 Hz, visando isolar as características do sinal nessa faixa de frequência. O sinal, assim filtrado, é mostrado na Figura 5.3.

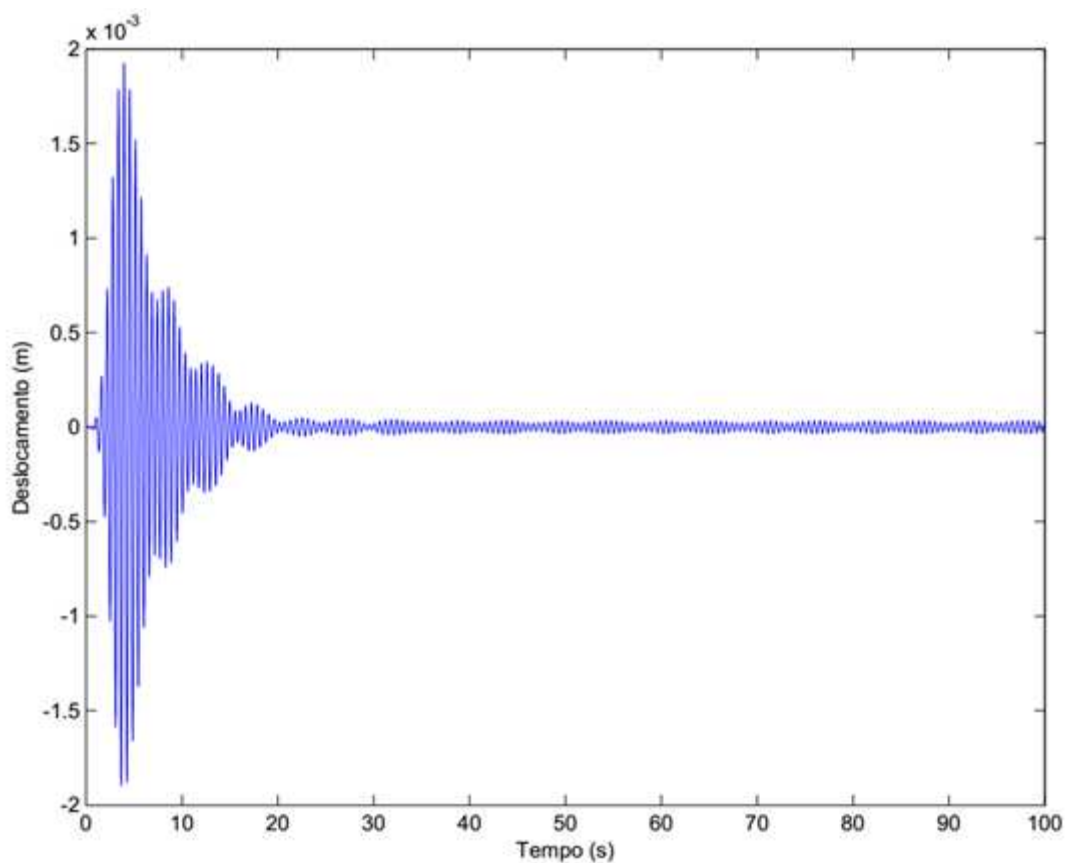


Figura 5.3 – Sinal filtrado do 1º modo de vibração

Para a aplicação da HHT, o primeiro passo é a Decomposição de Modo Empírico (EMD) para gerar as Funções de Modo Intrínsecas (IMFs), as quais são mostradas na Figura 5.4.

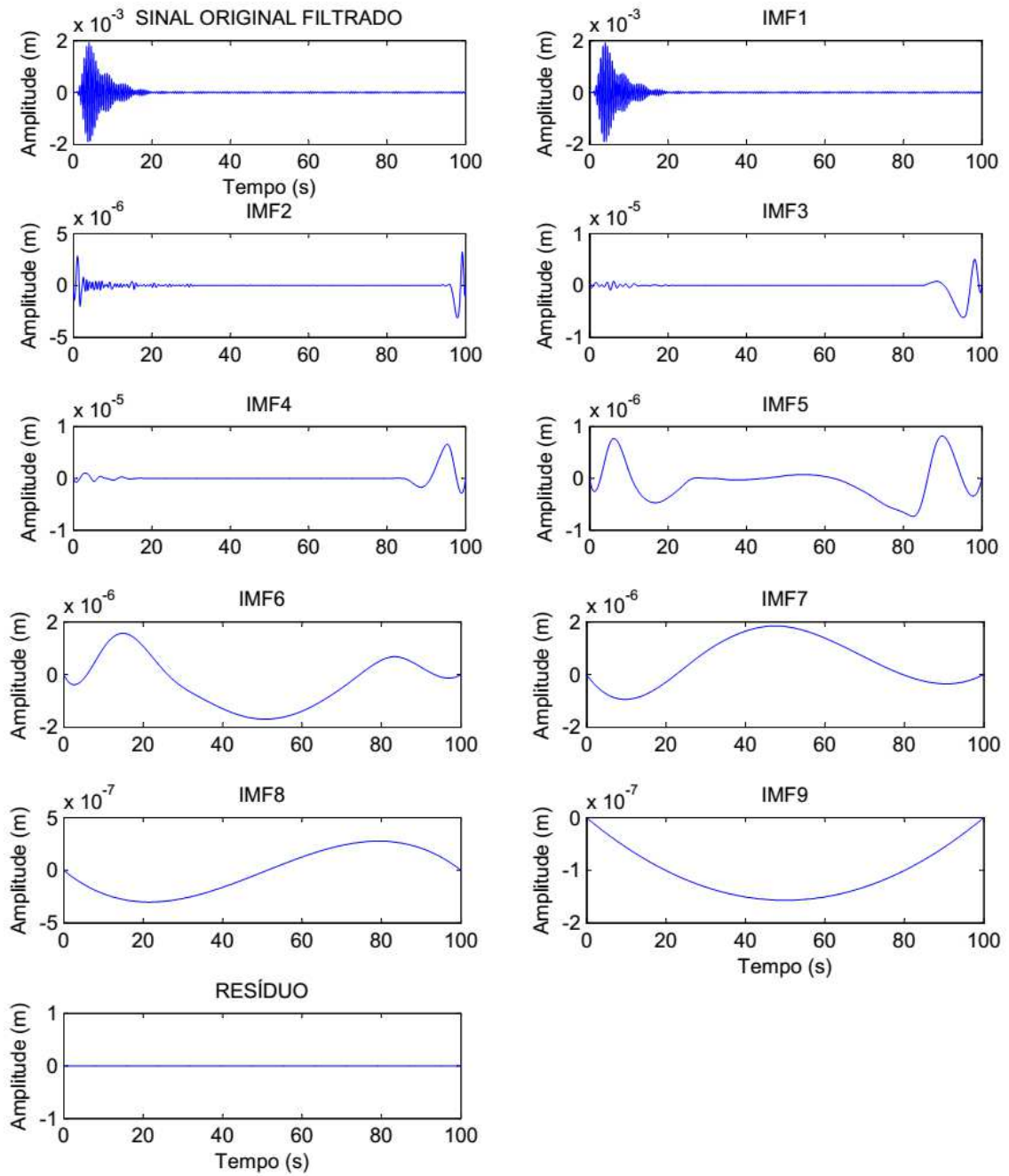


Figura 5.4 – IMFs do 1º modo

A seguir, a Transformada de Hilbert é aplicada a cada IMF, obtendo-se o espectro de frequência da Figura 5.5.

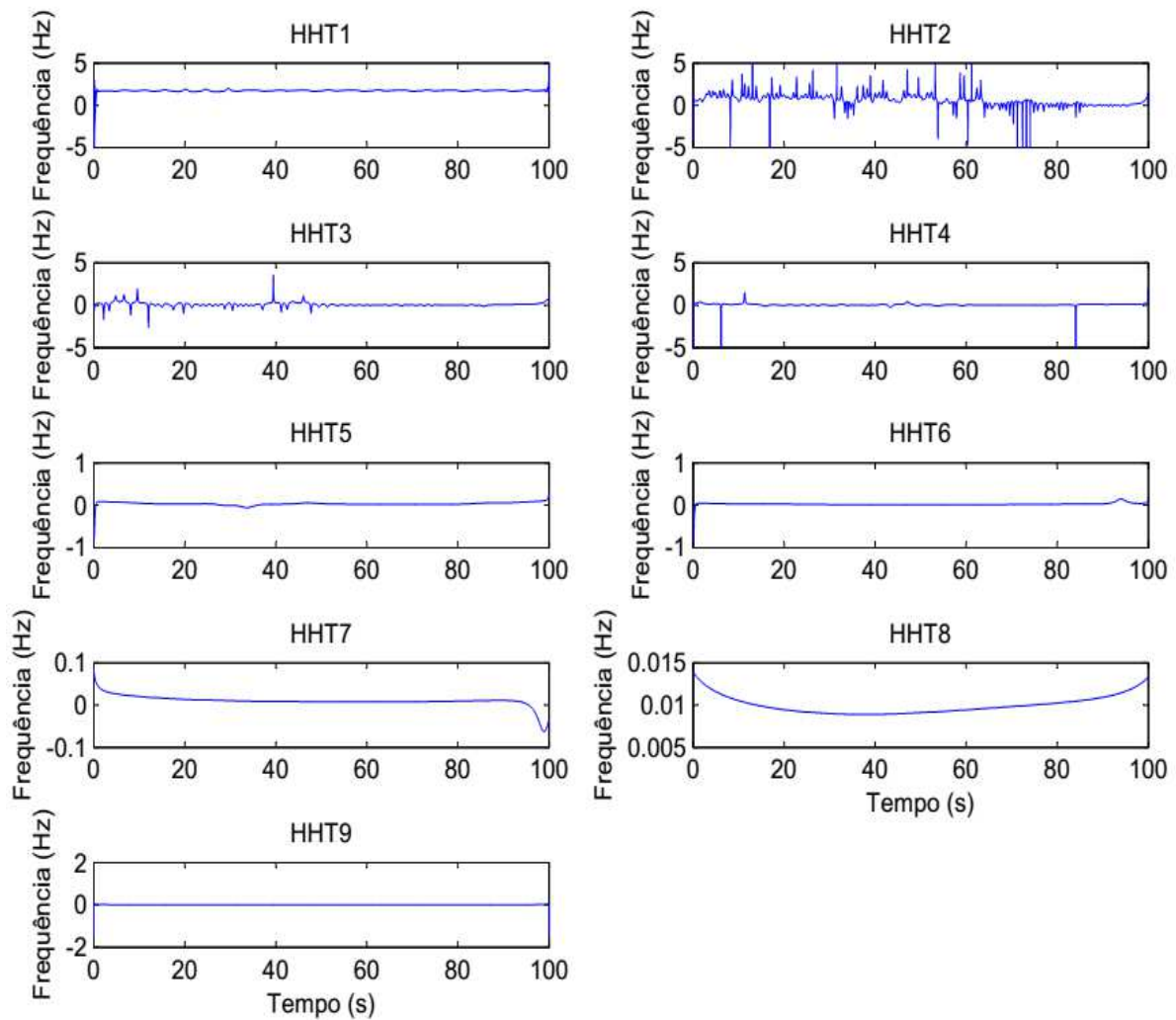


Figura 5.5 – HHT para cada IMF do 1º modo

Segundo (Peng et al, 2005) e (Jing et al, 2008), a primeira IMF, obtida por EMD, é a componente mais rica em informações, enquanto as outras são pseudo-componentes. Estas IMFs indesejáveis podem ser removidas da análise. Assim, os cálculos subsequentes podem ser realizados usando a primeira IMF.

A análise da HHT1 mostra que ela apresenta uma forma levemente oscilatória, com uma frequência média de 1,78 Hz, muito próximo da frequência da estrutura $w_1 = 1,82$ Hz conforme Figura 5.6.

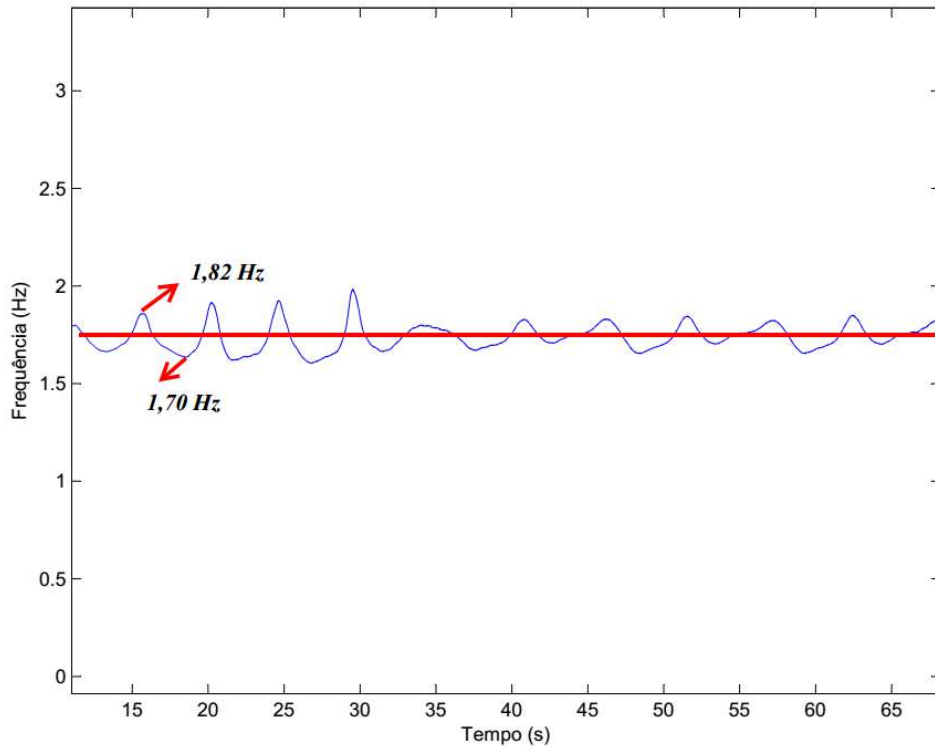


Figura 5.6 – HHT1 do 1º modo

Cálculo dos parâmetros modais do 1º modo:

A seguir são plotadas nas Figuras 5.7 e 5.8 o logaritmo natural da amplitude e o ângulo de fase da HHT1, respectivamente.

Na Figura 5.7 foram traçados 2 retas imaginárias (b_1 , e b_2), denotando a inclinação do logaritmo da amplitude em determinadas zonas. No caso da Figura 5.8, só foi necessário traçar uma reta de inclinação do ângulo de fase. Assim, considerando a inclinação da reta b_2 , (a inclinação b_1 não dá o resultado esperado) de do logaritmo da amplitude e a reta da inclinação do ângulo de fase, ambas no intervalo de tempo [20,30] segundos, tem-se que:

$$b = inclinação_{logaritmo} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{-10,72 - (-10,49)}{29,35 - 25,17} = -0,055$$

$$d = inclinação_{fase} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{375,80 - 344,70}{25,14 - 22,35} = 11,150$$

Portanto, usando as Equações (4.29) e (4.30):

$$-0,055 = -\xi \omega_n \quad e \quad 11,15 = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

$$\hat{\xi} = 0,005 \text{ e } \hat{\omega}_n = 1,78 \text{ Hz}$$

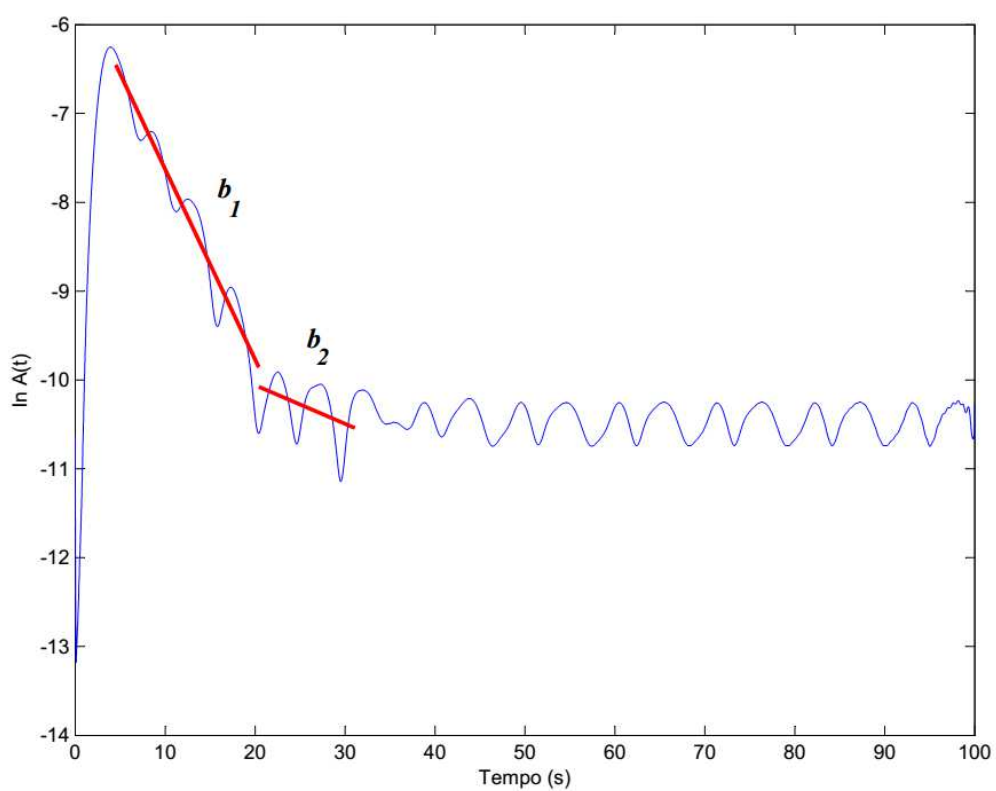


Figura 5.7 – Logaritmo da amplitude para o 1º modo

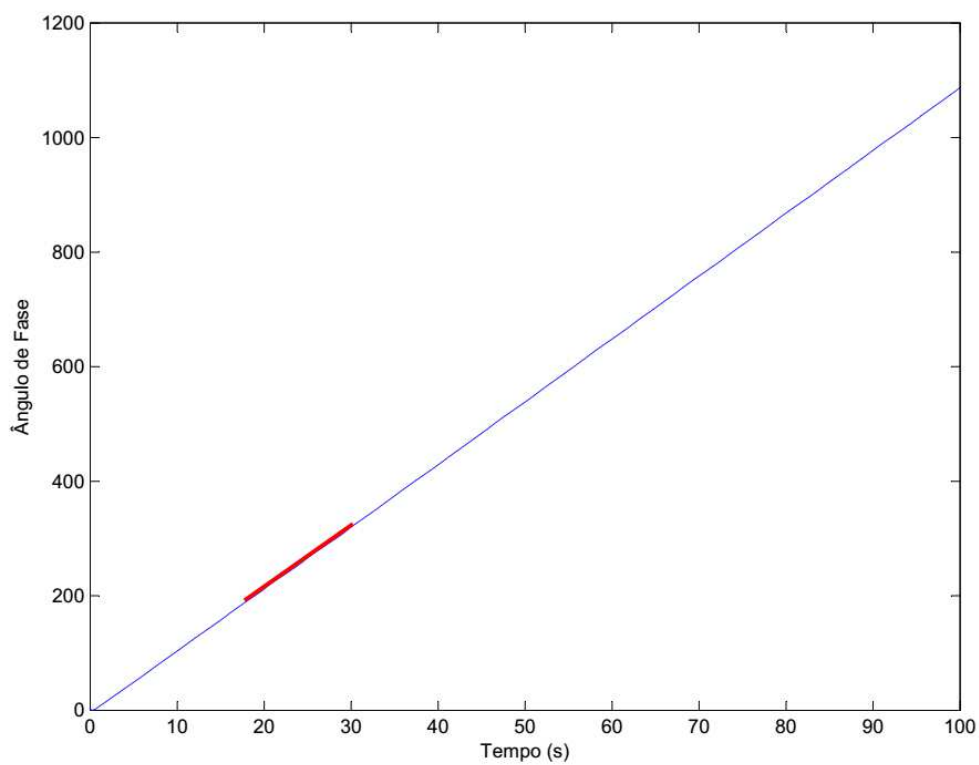


Figura 5.8 – Gráfico do ângulo de fase para o 1º modo

5.4 Análise do 2º Modo

Para extrair os parâmetros do 2º modo, o sinal gerado no primeiro modo foi filtrado com um filtro passa-faixa entre as frequências de 8,86 Hz e 12,86 Hz. O sinal filtrado é mostrado na Figura 5.9.

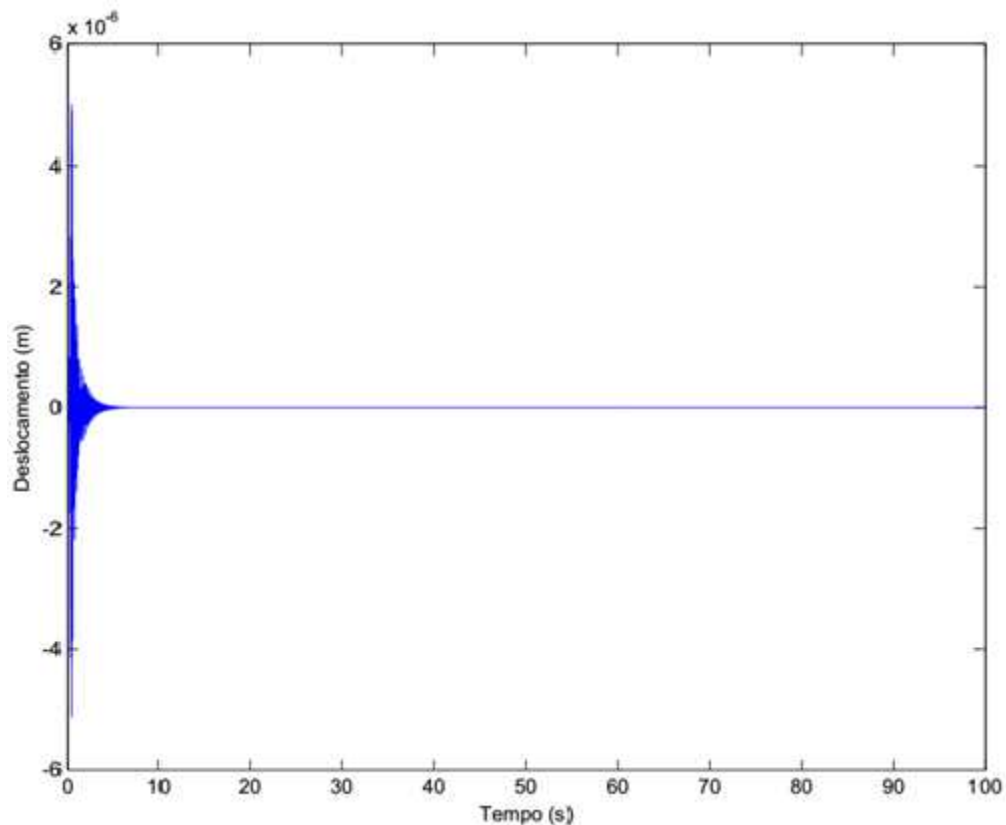


Figura 5.9 – Sinal filtrado entre as frequências 8,86 Hz e 12,86 Hz do modo de vibração

Em seguida faz-se a decomposição do sinal em funções intrínsecas, apresentadas na Figura 5.10, para se obter então a Transformada de Hilbert-Huang, para cada uma das IMFs mostradas na Figura 5.11.

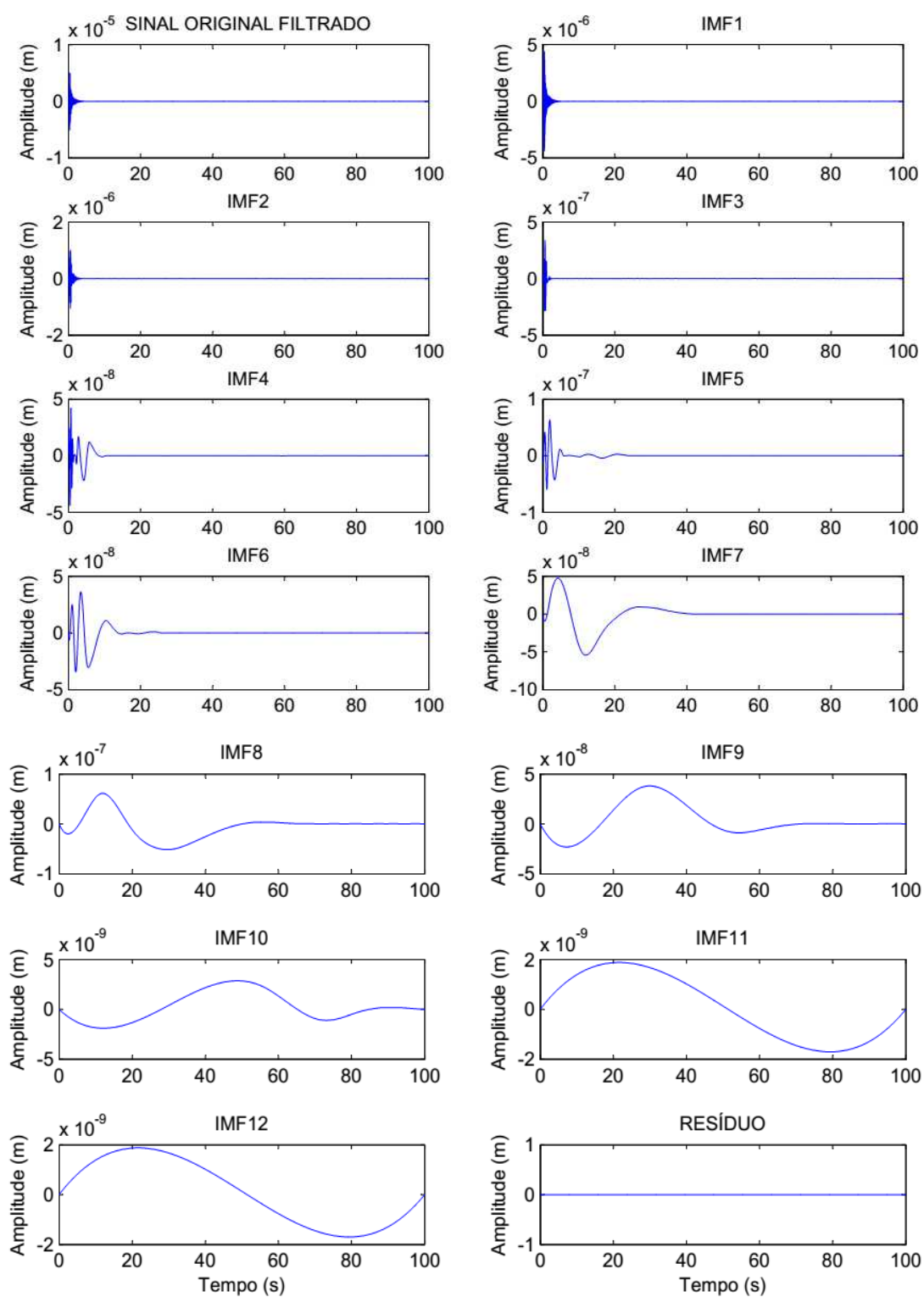


Figura 5.10 – IMFs para o 2º modo

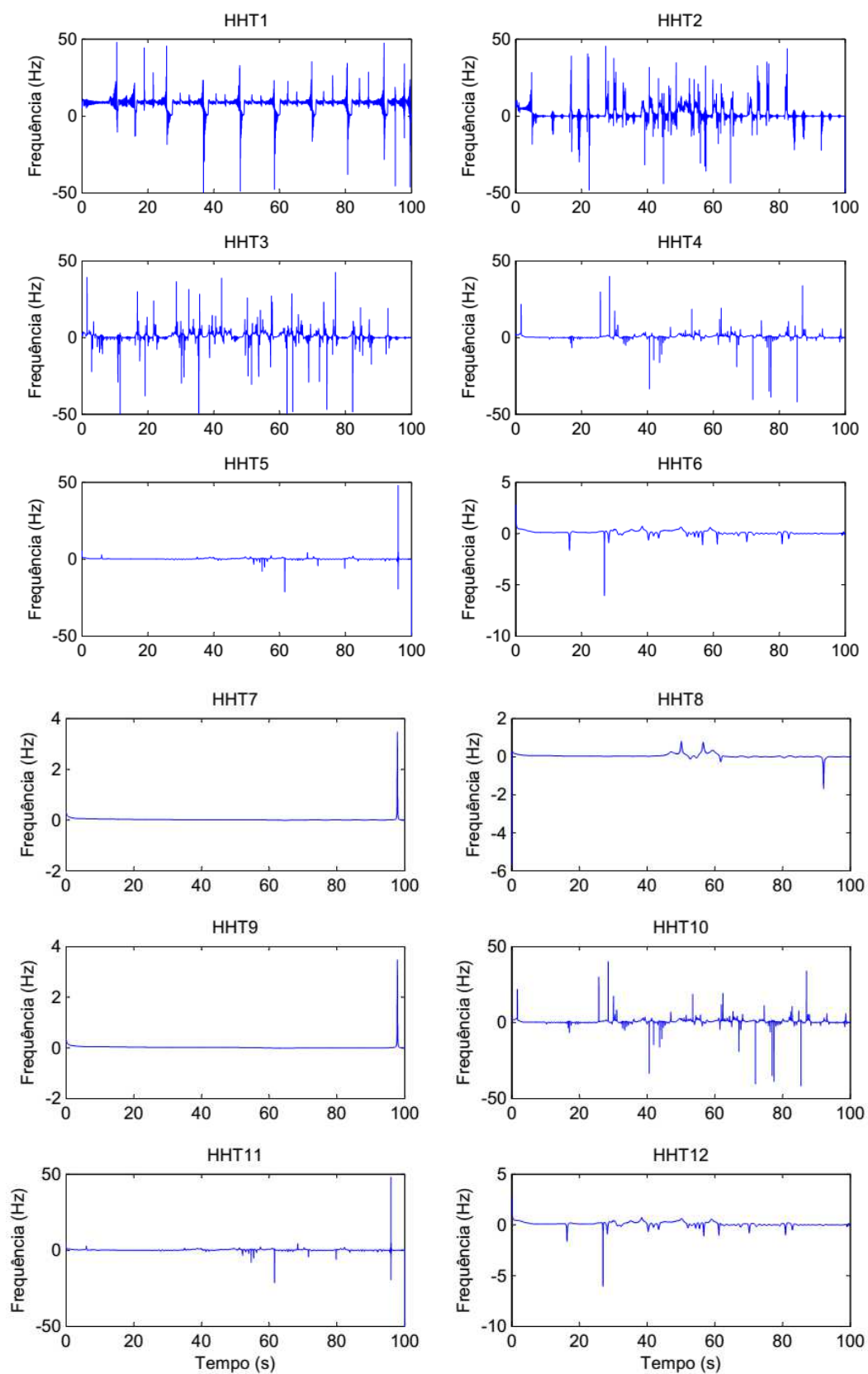


Figura 5.11 – HHT para o 2º modo

Conforme já foi dito, o Espectro de Fourier não detecta essa segunda frequência fundamental do segundo modo. Pelas IMFs obtidas, só a primeira pode ser considerada na análise de vibração do segundo modo, sendo as outras IMFs negligenciadas para essa análise. Como pode ser observado na Figura 5.12, a HHT1 mostra uma severa variação da segunda frequência fundamental, com frequência média de 9,11 Hz. O primeiro modo possui leve variação, sendo mais fácil o estudo da ressonância da estrutura.

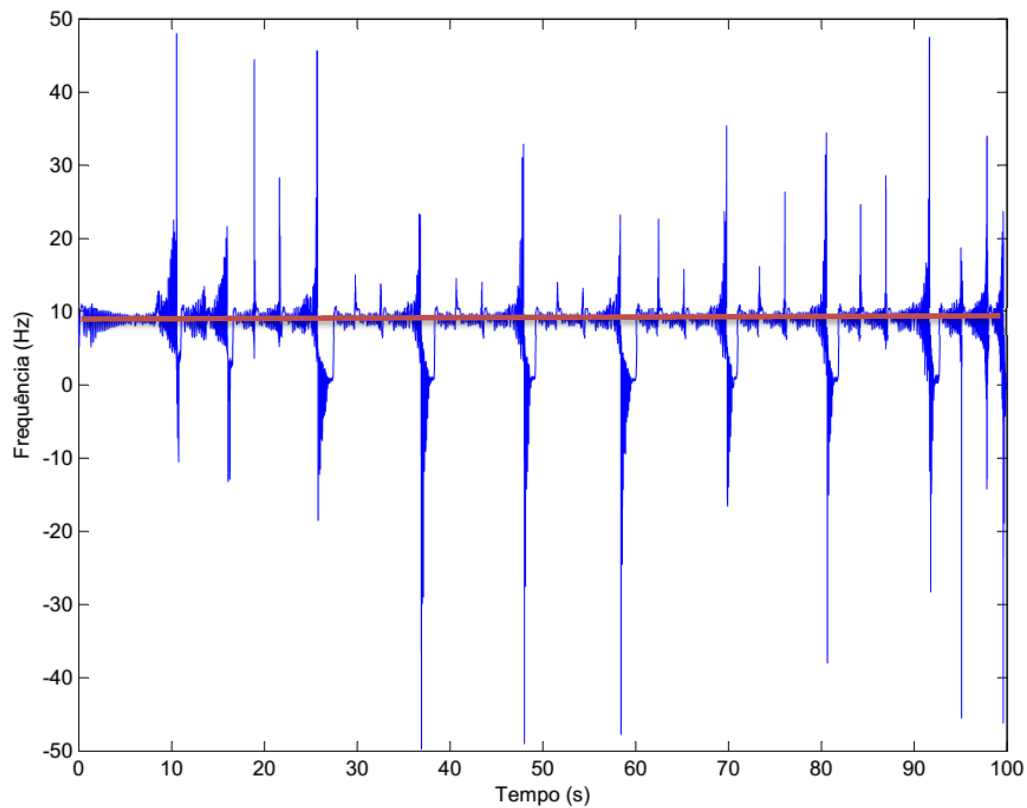


Figura 5.12 – HHT1 para o 2º modo

Cálculo dos parâmetros modais do 2º modo.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam o logaritmo natural da amplitude e o ângulo de fase, respectivamente, do gráfico da HHT1. Nessas figuras também são mostradas as retas imagináveis correspondentes às inclinações das curvas geradas.

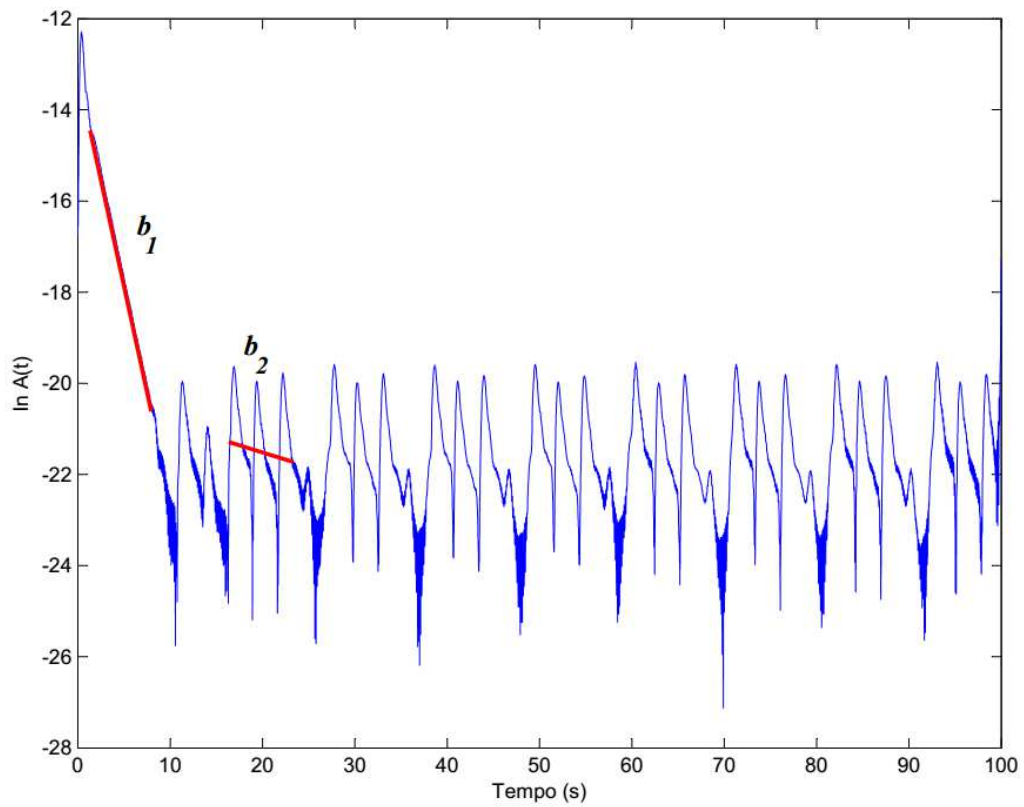


Figura 5.13 – Logaritmo da amplitude para o 2º modo

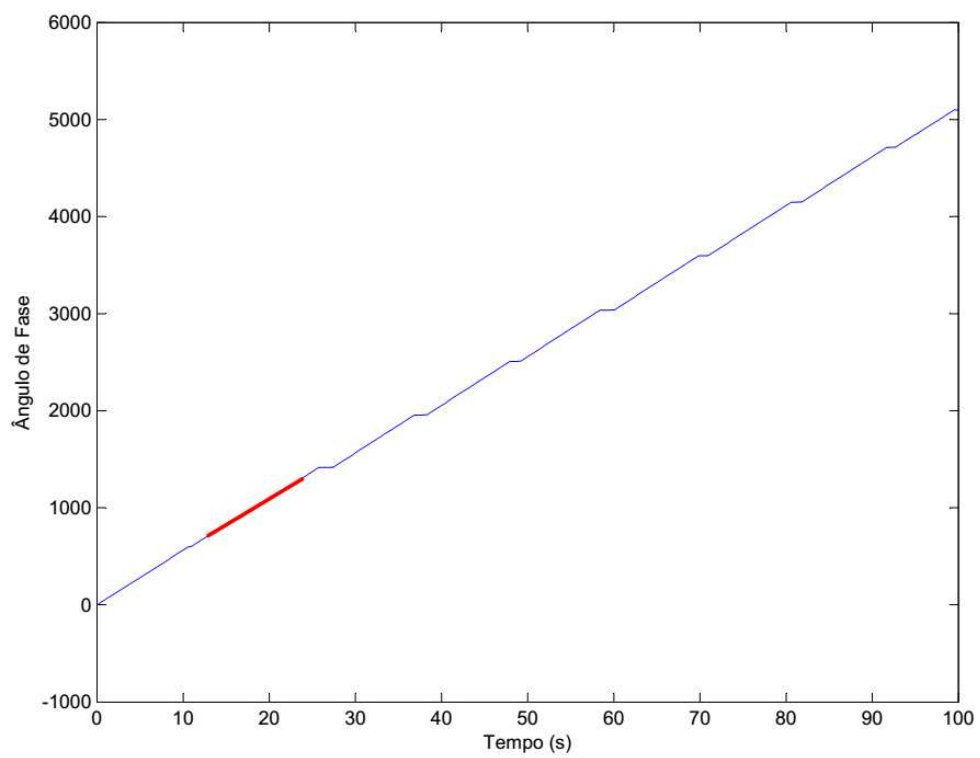


Figura 5.14: Gráfico do ângulo de fase para o 2º modo

Das Figuras 5.13 e 5.14, considerando as inclinações nos intervalos de tempo de [13,30] segundos, tem-se que:

$$b = inclinação_{logaritmo} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{-22,72 - (-22,49)}{22,35 - 18,17} = -0,055$$

$$d = nclinação_{fase} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1947 - 1471}{24,69 - 16,37} = 57,212$$

$$-0,055 = -\xi\omega_n \quad e \quad 57,212 = \omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

$$\hat{\xi}=0,005 \text{ e } \hat{\omega}_n= 9,11 \text{ Hz}$$

A Transformada de Hilbert-Huang detecta todas as frequências instantâneas (Neves, 2012), enquanto que o cálculo do logaritmo da amplitude e da fase acham a frequência modal e o amortecimento modal médio. No caso do sistema de um grau de liberdade linear estudado anteriormente o resultado esperado foi coincidente com o da HHT porque a frequência usada foi a média. Já no caso da plataforma estudada aqui, a frequência dada não foi a média, ela foi extraída de sinais que geraram uma frequência próxima da média. A análise foi feita em cima da 1º HHT por ser a função mais rica de informação do sistema, podendo assim desprezar as outras. O fator de amortecimento estimado, tanto no primeiro como no segundo modo de vibração, mostraram-se iguais aos dados de projeto da plataforma. Já, em relação à frequência natural, a técnica utilizada proporciona um valor muito próximo para o 1º modo. É necessário enfatizar que estas estimativas são valores médios do espectro da Figura 5.13.

Uma análise de oscilações para uma frequência de onda de $\Omega = 1,818 \text{ Hz}$ não foi realizada, mas como a HHT independe da frequência da onda de excitação é esperado que resultados semelhantes fossem obtidos.

Na tabela 5.1 encontra-se o quadro comparativo dos parâmetros modais.

Tabela 5.1: Comparação dos parâmetros.

Modo	Modelo		HHT	
-----	ξ (%)	ω_n (Hz)	$\hat{\xi}$ (%)	$\hat{\omega}_n$ (Hz)
1º	0,5	1,82	0,5	1,78
2º	0,5	10,87	0,5	9,11

Capítulo 6

Controle da Plataforma *Offshore*

Sujeita a Perturbações Persistentes

6.1 Introdução

Localizado em ambiente hostil, estruturas *offshore* são expostas a todos os tipos de cargas como ventos, ondas, correntes, terremotos, etc. Entre todas as perturbações mencionadas, a força dinâmica de onda induzida é a mais importante carga no ambiente marinho. Para a segurança da estrutura, as respostas do deslocamento e velocidade da plataforma *offshore* podem ser atenuadas por métodos dissipativos de energia. Em décadas recentes, dispositivos e métodos de controle incluindo o controle passivo, controle ativo e a combinação de seus esquemas têm sido propostos para estruturas *offshore* sujeitas a forças de onda induzida.

Todos os trabalhos encontrados na literatura técnico-científica sobre controle de plataformas *offshore* utilizaram técnicas de controle contínuo para o projeto do controlador (veja a revisão bibliográfica no capítulo 1). Em vista disto, o presente capítulo trata sobre o projeto e aplicação de um controlador ótimo linear quadrático (LQ) discreto visando regular a resposta dinâmica da plataforma *offshore* fixa tipo jaqueta sujeita a forças hidrodinâmicas de ondas e correntes marinhas.

6.2 Modelo Dinâmico da Estrutura Linear com Controle Ativo

Durante a ação das forças hostis sobre a plataforma *offshore* a máxima conjugação de forças e pressões ocorre no 1º andar da plataforma, porém o controle é feito no convés, conforme mostrado na Figura 6.1.

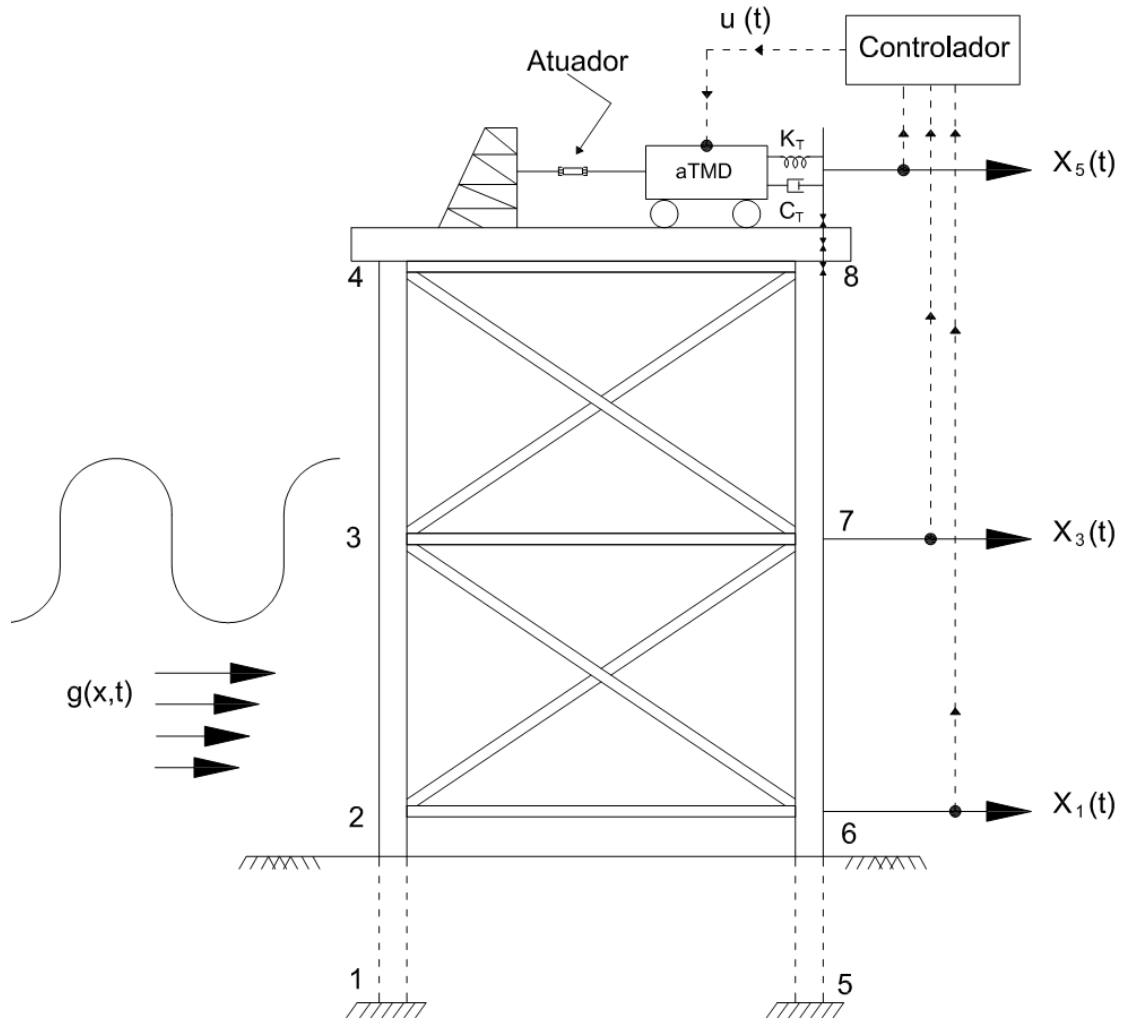


Figura 6.1 – Plataforma *offshore* com controle ativo

O modelo físico da estrutura da Figura 6.1, conforme estudado no capítulo 3, é descrito pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Fg(x, t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (6.1)$$

Sendo que:

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

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

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

São os mesmos parâmetros do modelo descrito no capítulo três na equação (3.12), exceto a matriz C da saída, que geram como saída os deslocamentos no primeiro andar, segundo andar e da aTMD.

6.3 Controlador Ótimo LQ

O controle ótimo teve suas origens no cálculo variacional no século XVII (Fermat, Newton, Leibnitz e Bernoullis). O cálculo variacional foi desenvolvido posteriormente no século XVIII por Euler e Langrange, e no século XIX por Legendre, Jacobi, Hamilton e Weierstrass. No começo do século XX, Bolza e Bliss deram o refinamento final no assunto. Em 1957, Bellman dá uma nova visão da teoria de Hamilton-Jacobi, o qual chamou de programação dinâmica, que é basicamente um esquema de controle por realimentação. Em 1962, Pontryagin estendeu o cálculo variacional para lidar com restrições de desigualdade na variável de controle, enunciando seu elegante princípio máximo. Também, nos inícios dos anos 60, Kalman, Bucy, Athans entre muitos outros mostraram como aplicar o cálculo variacional no projeto de controladores digitais ótimos por realimentação para sistemas dinâmicos

lineares com ruído. A partir de 1980 até a atualidade, a pesquisa está direcionada em fazer com que o controle ótimo por realimentação seja mais robusto a perturbações na planta e a erros no modelo.

O controle ótimo LQ é uma teoria elegante e bem estabelecida (Mäkilä, 2000). Esta técnica trata o problema de encontrar uma lei de controle de um sistema linear em espaço de estados, de dimensão finita, que minimize um índice de desempenho quadrático, na regulação/acompanhamento do erro e nas variáveis de controle. Esta técnica é importante por várias razões (Mosca, 1995):

- O controle LQ provê um conjunto de procedimentos analíticos de projeto que facilitam a síntese de sistemas de controle com boas propriedades. Estes procedimentos geram uma solução que pode, também, ser usada como uma estimativa inicial em um processo iterativo de tentativa e erro, no caso em que algumas especificações não sejam encontradas pela solução LQ inicial;
- O controle LQ permite projetar sistemas de controle baseado nas informações disponíveis para o controlador. Além dessas informações, se o set-point a ser seguido for conhecido, ações de controle tanto por realimentação como antecipatória podem ser conjuntamente obtidas;
- Metodologias de projeto de controladores mais avançados, tal como a teoria de controle, podem ser consideradas como uma extensão do controle LQ;
- O controle LQ pode ser aplicado a sistemas não-lineares operando em pequenas regiões;
- Existe uma relação de dualidade entre o controle LQ e a predição linear por mínimos quadrados, filtragem e alisamento.

Dependendo da natureza do sistema linear a ser controlado, o controle LQ pode ser determinístico, conhecido como regulador linear-quadrático (LQR), ou estocástico, chamado de compensador linear-quadrático gaussiano (LQG) ou controlador. Referências padrões sobre o assunto podem ser encontradas em Kwakernaak e Sivan (1972), Anderson e Moore (1990) e Dorato et al. (1995). O LQR é considerado a pedra fundamental da teoria de controle moderna. A partir da sua concepção nos anos 60, o LQR tem sido objeto de inúmeras pesquisas. Basicamente, o LQR é, nada mais que, a solução de um problema de otimização, que tem algumas propriedades muito atrativas. Especialmente, o controlador ótimo assegura um sistema estável em malha fechada,

alcança níveis garantidos de robustez e é simples de ser calculado (Lublin e Athans, 1996). A presente tese trata do LQR discreto por realimentação de estados. Dado que este assunto é amplamente abordado em vários livros e artigos de pesquisa, neste capítulo, a síntese deste controlador será brevemente apresentada, e está de acordo com o livro de Morari et al. (2002).

Seja o sistema linear determinístico, discreto, dado por:

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) = C_d x(k) \end{cases} \quad (6.2)$$

com a condição inicial $x(0) = x_0$. Em que A_d , B_d e C_d são as versões discretas das matrizes A , B e C . O objetivo é encontrar uma sequência de entradas ou uma lei de realimentação que minimize a função de custo quadrática da forma¹ (problema de otimização em malha aberta):

$$V_p = x^T(p)Q_t x(p) + \sum_{k=0}^{p-1} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)] \quad (6.3)$$

sendo Q_t e Q matrizes reais, simétricas, semi-definidas positivas e R uma matriz real, simétrica, definida positiva. Se p for um número finito, será um problema de horizonte finito, e se $p=\infty$, será um problema de horizonte infinito.

1. Se a função objetivo for dada em termos do vetor de saída em vez do vetor de estados, então a função objetivo pode ser modificada usando a equação de saída.

6.3.1 O Problema LQ de Horizonte Finito

Considere o problema de controle ótimo quadrático de horizonte finito:

$$J_p(x_0) = \min_{u(0), \dots, u(p-1)} V_p \quad (6.4)$$

Uma forma conceitualmente simples de resolver o problema (6.4) é desenvolver uma equação linear explícita entre a sequência de estados futuros e a sequência de entradas futuras, e colocar esta equação dentro da função objetivo para ser resolvida por mínimos quadrados, dando uma solução (trajetória) ótima em malha aberta. Outra forma mais sofisticada e elegante de resolver o problema (6.4), e que dá uma solução ótima em malha fechada, é usando o princípio de *otimalidade e programação dinâmica*. A ideia é reformular o problema como uma série de problemas de controle ótimo de um passo. Para isto a seguinte definição é útil:

Definição 6.1: O custo ótimo para o problema $(p-k)$ passos

$$J_k(z) \equiv \min_{u(p-j), \dots, u(p-1)} \{ x^T(p) Q x(p) + \sum_{i=p-k}^{p-1} [x^T(i) Q x(i) + u^T(i) R u(i)] \} \quad (6.5)$$

para o sistema $x(i+1) = A_d x(i) + B_d u(i)$, com a condição inicial $x(p-j) = z$, é chamada de “custo de k -passos” para z . Este é o mínimo custo incorrido em solucionar o problema de controle ótimo k -passos, partindo do estado z .

O princípio de otimalidade menciona que uma lei ótima tem a propriedade que qualquer que seja a condição inicial e a decisão inicial, as decisões posteriores devem ser ótimas com respeito ao estado resultante a partir da primeira decisão. Isto significa que a decisão ótima para $u(p-1)$ depende, somente, de $x(p-1)$ e não de $x(p-2)$ e $x(p-3)$, etc. Usando esta ideia e começando no tempo final p e indo para trás no tempo, é possível encontrar a melhor lei de controle para o último passo, independente de como o estado em um instante anterior foi alcançado. Este procedimento é chamado de programação dinâmica. Baseado nisto, o problema de um passo a partir do tempo $p-1$ fica:

$$J_1(x(p-1)) = \min_{u(p-1)} \{ x^T(p)S(p)x(p) + x^T(p-1)Qx(p-1) + u^T(p-1)Ru(p-1) \} \quad (6.6)$$

em que $S(p) \equiv Q_t$, e

$$x(p) = A_d x(p-1) + B_d u(p-1) \quad (6.7)$$

Substituindo a equação (6.7) na equação (6.6), tem-se:

$$J_1(x(p-1)) = \min_{u(p-1)} \{ (A_d x(p-1) + B_d u(p-1))^T S(p) (A_d x(p-1) + B_d u(p-1)) + x^T(p-1)Qx(p-1) + u^T(p-1)Ru(p-1) \} \quad (6.8)$$

no qual o mínimo é obtido de:

$$B_d^T S(p) (A_d x(p-1) + B_d u(p-1) + Ru(p-1)) = 0 \quad (6.9)$$

Avaliando a equação (6.9), a solução ótima é:

$$u(p-1) = -L(p-1)x(p-1) = - \left[(B_d^T S(p)B_d + R)^{-1} B_d^T S(p)A_d \right] x(p-1) \quad (6.10)$$

Usando a equação (6.10), o custo de um passo é dado por:

$$J_1(x(p-1)) = x^T(p-1)S(p-1)x(p-1) \quad (6.11)$$

em que:

$$S(p-1) = A_d^T S(p)A_d + Q - A_d^T S(p)B_d (B_d^T S(p)B_d + R)^{-1} B_d^T S(p)A_d \quad (6.12)$$

Agora, no próximo estágio, o problema de dois passos do tempo $p-1$ é solucionado de :

$$J_2(x(p-2)) = \min_{u(p-1), u(p-2)} \{ x^T(p)S(p)x(p) + \sum_{i=p-2}^{p-1} [x^T(i)Qx(i) + u^T(i)Ru(i)] \} \quad (6.13)$$

que é equivalente ao problema do estágio seguinte com o custo herdado do estágio prévio, isto é:

$$J_2(x(p-2)) = \min_{u(p-2)} \{x^T(p-1)S(p-1)x(p-1) + x^T(p-2)Qx(p-2) + u^T(p-2)Ru(p-2)\} \quad (6.14)$$

Esta equação tem a mesma forma da equação (6.6) e, portanto a solução ótima é:

$$u(p-2) = -L(p-2)x(p-2) = -\left[(B_d^T S(p-1)B_d + R)^{-1}B_d^T S(p-1)A_d\right]x(p-2) \quad (6.15)$$

com o custo de dois passos dado por:

$$J_1(x(p-2)) = x^T(p-2)S(p-2)x(p-2) \quad (6.16)$$

em que:

$$S(p-2) = A_d^T S(p-1)A_d + Q - A_d^T S(p-1)B_d(B_d^T S(p-1)B_d + R)^{-1}B_d^T S(p-1)A_d \quad (6.17)$$

Continuando com este procedimento (isto é, resolvendo sucessivamente, $J_{p-k}(x(k))$, $\forall k = p-1, \dots, 0$, e propagando o custo), é obtida a seguinte sequência ótima para o problema original (6.5):

$$u(k) = -L(k)x(k), \quad \forall k = p-1, \dots, 0 \quad (6.18)$$

Sendo que:

$$L(k) = (B_d^T S(k+1)B_d + R)^{-1}B_d^T S(k+1)A_d \quad (6.19)$$

e:

$$S(k) = A_d^T S(k+1)A_d + Q - A_d^T S(k+1)B_d(B_d^T S(k+1)B_d + R)^{-1}B_d^T S(k+1)A_d \quad (6.20)$$

A equação (6.20), chamada de *equação de Ricatti discreta* ou *equação de diferença de Riccati* (DRE), é inicializada em $S(p) = Q_t$ e é resolvida de frente para trás. O custo ótimo para o estágio p é:

$$J_p(x_0) = x_0^T S(0)x_0 \quad (6.21)$$

Como pode ser visto, com a programação dinâmica, a lei de controle em cada passo de tempo é dada como uma função linear explícita do estado no tempo, isto é, na forma de uma lei de controle por realimentação de estados. O controle, quando implementado como uma lei por realimentação ao invés de uma trajetória em malha aberta, é mais robusta frente a perturbações e erros na modelagem.

6.3.2 O Problema LQ de Horizonte Infinito

Para processos contínuos operando sobre um longo período de tempo é razoável resolver o seguinte problema de horizonte infinito:

$$J_k(z) \equiv \min_{u(\cdot)} \left\{ V_\infty \equiv \lim_{p \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{p-1} [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)] \right\} \quad (6.22)$$

Neste caso, a DRE é para ser inicializada em $S(p) = Q$ e resolvida de frente para trás. Assumindo que, depois de um número finito de iterações, a solução da DRE converge à sua solução estacionária (S_∞), então da equação (6.20) temos que:

$$S_\infty = A_d^T S_\infty A_d + Q - A_d^T S_\infty B_d (B_d^T S_\infty B_d + R)^{-1} B_d^T S_\infty A_d \quad (6.23)$$

a qual é chamada de *equação de Ricatti algébrica discreta* (DARE). (Solução usando função `dare.m` do *Control Systems Toolbox* do MATLABTM).

A equação (6.23) admite, em geral, muitas soluções. Porém uma única solução estacionária é obtida se forem impostas condições de estabilidade¹ e detectabilidade².

Teorema: Se o par (A_d, B_d) for estabilizável e o par $(A_d, Q^{T/2})$ for detectável, então a DARE (6.23) terá uma única solução positiva semi-definida, com todos os autovalores de $(A_d - B_d L_\infty)$ dentro do círculo unitário.

Sendo assim, a lei de controle ótimo por realimentação é dada por:

$$u(k) = -L_\infty x(k), \quad \forall k = 0, \dots, \infty \quad (6.24)$$

1. Condição suficiente para estabilidade é controlabilidade.

2. Condição suficiente para detectabilidade é observabilidade.

em que L_∞ é o ganho estabilizante de realimentação de estados definido, a partir da equação (6.19), como:

$$L_\infty = (B_d^T S_\infty B_d + R)^{-1} B_d^T S_\infty A_d \quad (6.25)$$

que gera um sistema estável em malha fechada, com um custo ótimo de horizonte infinito:

$$J_\infty(x_0) = x_0^T S_\infty x_0 \quad (6.26)$$

A síntese anterior descreve o famoso LQR convencional conforme derivado por Kalman (1960). É possível adicionar restrições, nos estados e nas entradas, ao LQR. Nesse caso, não é possível usar a programação dinâmica para o desenvolvimento do controlador, sendo necessário o uso de algum algoritmo de otimização on-line. O LQR com restrições é também chamado de controle ótimo LQ (de horizonte infinito) com restrições.

6.4 Aplicação do Controle na Plataforma *Offshore*

O projeto do sistema de controle LQR é relativamente simples e fácil de ajustar. A lei de controle (6.24) assume uma completa medição de estados para realimentação. Se os estados não estão disponíveis, um observador de estados precisa ser desenvolvido.

No presente trabalho o vetor de estados está composto de deslocamentos e velocidades dos modos da estrutura *offshore*, os quais são assumidos disponíveis e mensuráveis. Considerando um tempo de amostragem $T_s = 0,01 \text{ s}$ as matrizes do modelo discreto da plataforma na forma da Equação (6.2) são:

$$A_d = \begin{bmatrix} 0,9998 & 0,01 & 0 & 0 & -0,0003 & 0 \\ -0,0332 & 0,9996 & 0,0002 & 0 & -0,0533 & -0,0091 \\ 0 & 0 & 0,9941 & 0,01 & 0,0003 & 0 \\ 0,0002 & 0 & -1,1784 & 0,9930 & 0,0532 & 0,0090 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9998 & 0,01 \\ -0,0001 & 0 & 0,0001 & 0 & -0,0330 & 0,9944 \end{bmatrix}$$

$$B_d = 10^{-4} \begin{bmatrix} 0,0017 \\ 0,3433 \\ -0,0017 \\ -0,3428 \\ 0,0011 \\ 0,2124 \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Utilizando a teoria do controle ótimo para o problema de horizonte infinito e seguindo diretrizes práticas dadas em Lin (1994), os parâmetros de ajuste do controlador são:

$$Q = 2955H \text{ em que } H = (C_d^T)(C_d);$$

$$R = 103;$$

A Figura 6.2 ilustra o modelo da Figura 6.1 no simulador. Esse sistema possui uma chave que tem a função de simular a plataforma sem o controlador e com o controlador.

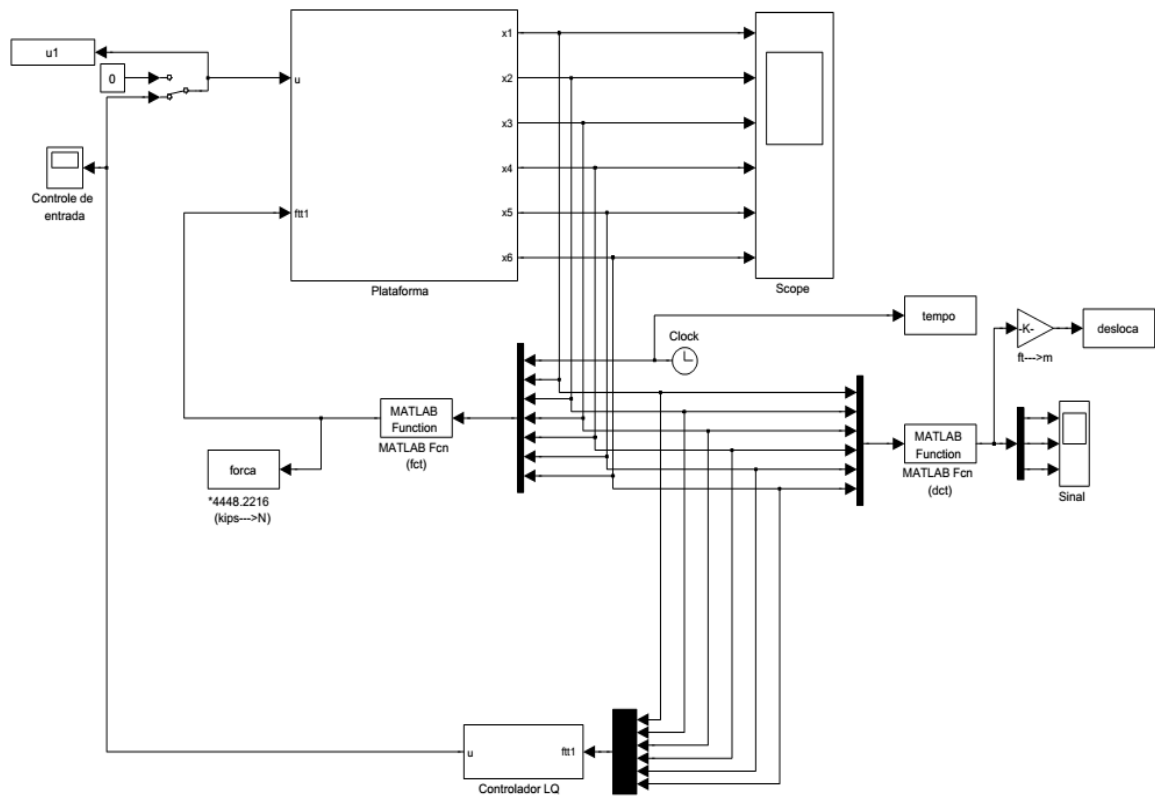


Figura 6.2 – Sistema de controle da plataforma *offshore* no simulador

O desempenho da estrutura com controle ótimo LQ aos efeitos das forças no ambiente *offshore* é mostrado a seguir. Para uma frequência de onda $\Omega = 0,5773$ Hz as amplitudes das oscilações pico a pico dos três andares sofreram uma redução de 5%, o comportamento de picos múltiplos testemunhado na resposta descontrolada é completamente eliminado, ficando a resposta dinâmica muito mais suave com o controle aplicado conforme ilustrado na Figura 6.3. Na Figura 6.4 mostra a força de controle da entrada para o equilíbrio da estrutura.

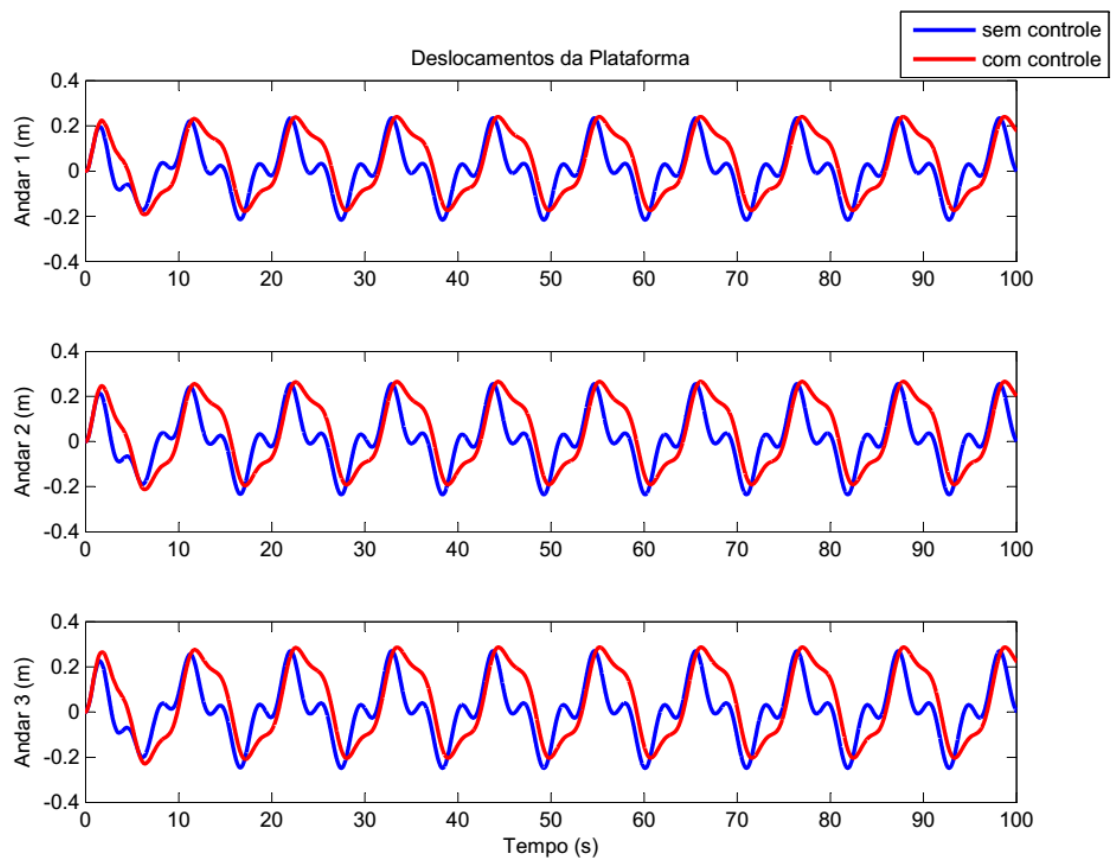


Figura 6.3 – Resposta da plataforma com controle para uma frequência de onda de $\Omega = 0,5773$ Hz

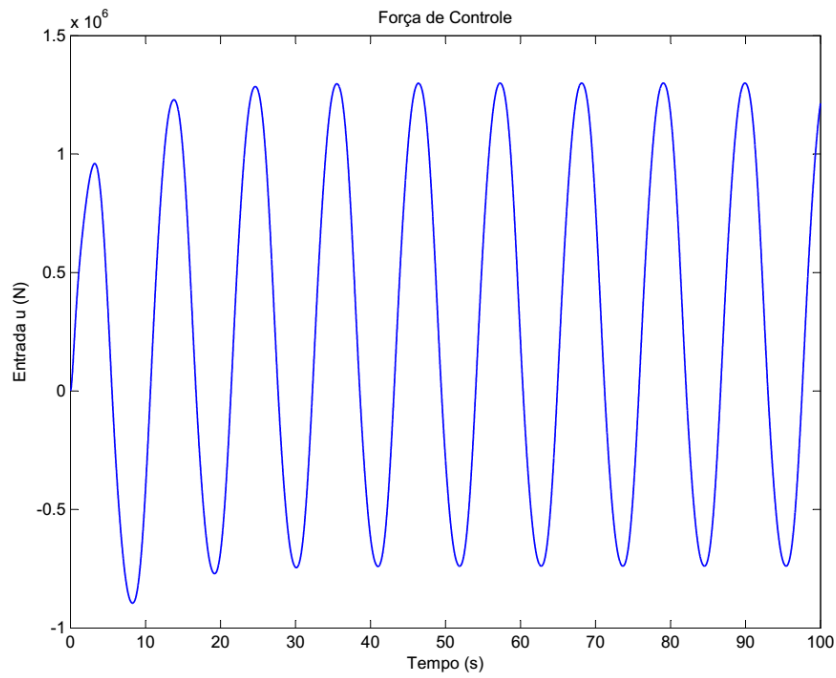


Figura 6.4 – A força de controle da entrada para $\Omega = 0,5773$ Hz

Já para uma frequência de $\Omega = 1,8$ Hz, próximo à primeira frequência natural da plataforma, a Figura 6.5 mostra que os deslocamentos absolutos dos modos da plataforma foram menores, chegando a uma redução nas amplitudes das oscilações de aproximadamente de 58% nas respostas dinâmicas dos três andares. Ou seja, com uma frequência de onda próximo da frequência de ressonância da plataforma, o controle reduz a amplitude das oscilações dos deslocamentos para o nível da situação de uma frequência de onda de $\Omega = 0,5773$ Hz. Esse fato mostra o bom desempenho do controlador LQR. A força de controle aplicada é mostrada na Figura 6.6.

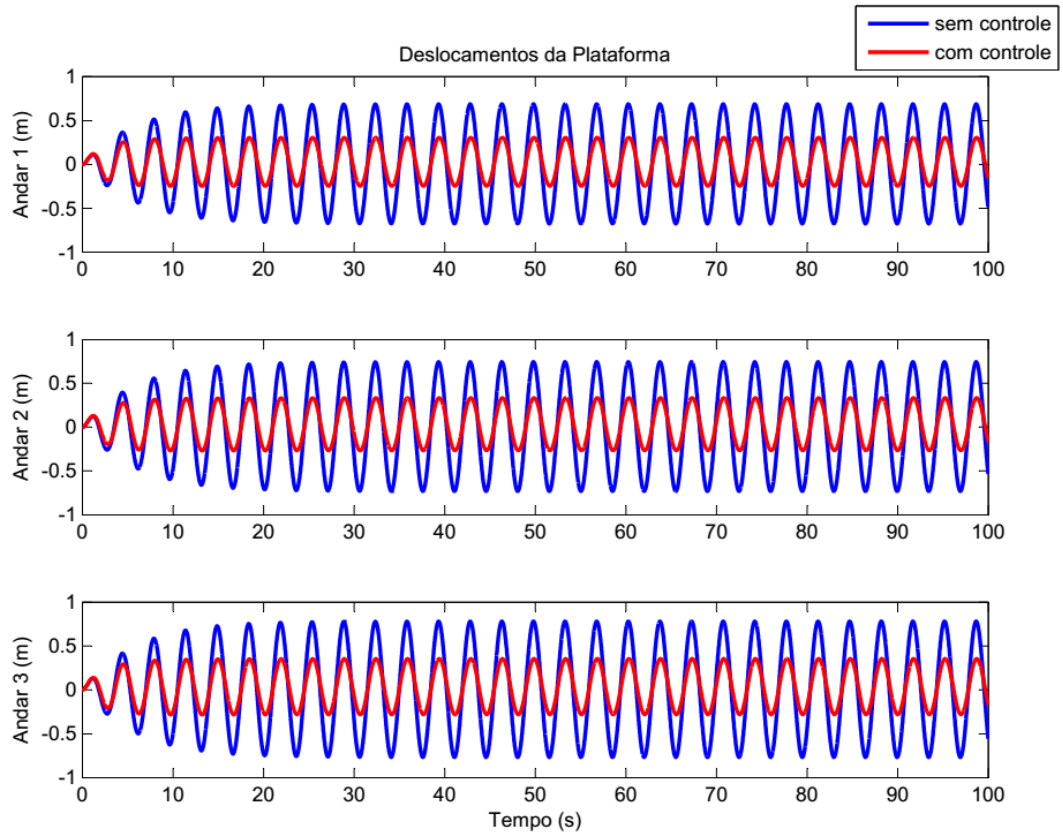


Figura 6.5 – Resposta da plataforma com controle para uma frequência de onda de $\Omega = 1,8 \text{ Hz}$

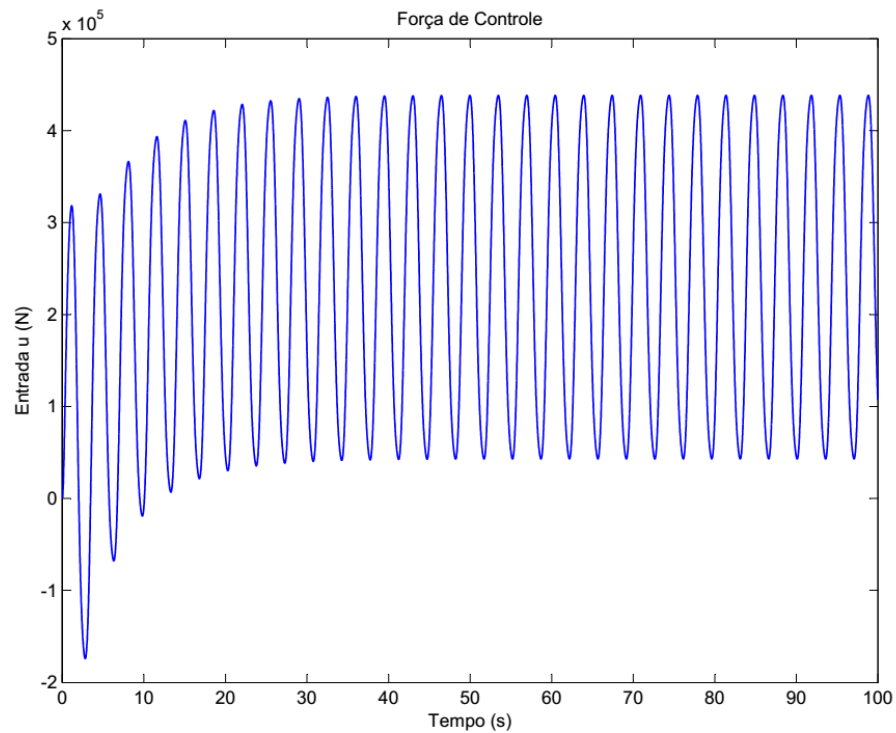


Figura 6.6 – A força de controle da entrada para $\Omega = 1,8 \text{ Hz}$

Tentando obter uma maior redução nas amplitudes de oscilação do sistema, montou-se um sistema multi-malha proposto por Terro et al (1999), cujo desenvolvimento consiste em dois estágios consecutivos, sendo o primeiro chamado de projeto nominal, que é responsável pela estabilização da parte linear do modelo dinâmico da plataforma, projeto igual ao realizado neste trabalho. O segundo estágio compreende um componente de controle adicional, i.e. um projeto compensatório, que tem por objetivo controlar as não linearidades para manter o modelo dinâmico estável. Os resultados das simulações dessa nova implementação não trouxe grandes diferenças em relação aos resultados previamente obtidos neste trabalho, pois a parte compensatória produz resposta de pequenas ordens de grandeza e que quando somados com a parte nominal praticamente não alteram o valor dos deslocamentos controlados.

Capítulo 7

Conclusões e Recomendações

Pelos resultados obtidos no trabalho pode-se notar o bom desempenho da Transformada de Hilbert-Huang (HHT) na busca dos parâmetros modais do sistema. Apesar de buscar uma frequência média de trabalho, a HHT também fornece frequências instantâneas que podem ser utilizadas na análise do sistema em função do tempo. Isso é muito importante, pois em sistemas não lineares e complexos podem ocorrer comportamentos inesperados, e de posse dessa ferramenta pode-se descobrir em qual frequência o fenômeno ocorre.

No primeiro sistema analisado, i.e., sistema massa-mola-amortecedor, a frequência natural do sistema é igual a frequência fundamental média obtida por HHT. No segundo caso, i.e., plataforma *offshore*, o sistema oscila a uma frequência acima da média verificada pela HHT. Os parâmetros modais estimados foram próximos dos valores de projeto da estrutura.

A HHT é ideal no trabalho de monitoramento de vibrações em estruturas *offshore*. Os resultados obtidos pela aplicação dessa ferramenta podem ser confrontados com os dados de projeto e monitorados durante a vida útil da estrutura. Caso haja alguma mudança brusca ou a longo prazo, é indicativo que a estrutura pode estar sofrendo de alguma patologia como fadiga, recalque, aumento de massa (excessiva incrustação), perda de massa (oxidação), amassamento, trincas, etc, sendo necessário buscar a melhor solução para a recuperação.

O controlador LQR se mostrou adequado no controle de oscilações da plataforma *offshore* provocadas por perturbações persistentes de ondas e correntes marinhas. Em geral, houve uma redução de mais de 50% na amplitude dessas oscilações, principalmente no momento de maior perigo, i.e., quando ocorre o fenômeno de ressonância na estrutura.

Para trabalhos futuros recomenda-se o uso de outras versões da HHT, a exemplo da HHT com sinal mascarado, e inclusive outras técnicas baseadas na frequência para

análise modal de estruturas. Recomenda-se também o uso de sinais oscilatórios reais de plataforma, ou mesmo de projetos de bancada de pequeno porte ou provenientes de modelos de plataformas mais elaborados, a exemplo de elementos finitos. Em relação ao controle, pode-se elaborar um observador para estimação dos estados do sistema que alimente o controlador LQR ou mesmo outra técnica de controle discreto para mitigação de oscilações em estruturas como o controle robusto ou o controle ótimo com restrições, como o controle preditivo.

Referências Bibliográficas

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

ABDEL-ROHMAN, M. (1996). Structural control of a steel jacket platform. *Structural and Engineering Mechanics*, **4**(2): 125-138.

ALMEIDA, C.A.M. (2008). *Tratamento do efeito da flexibilidade de juntas tubulares na análise de estruturas fixas offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

ALMEIDA, S.F.; HANAI, J.B. (2008). Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concretos submetidos à danificação progressiva até a ruptura. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, **10**(44): 49-66.

ANDERSON, B.D.O.; MOORE, J.B. (1990). *Optimal control - Linear quadratic methods*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc.

API RP 2 SIM (2009). Recommended practice for the structural integrity management of fixed offshore structures structural integrity management of fixed offshore platforms. *American Petroleum Institute*.

BRAVO, J.R.A. (2011). *Projeto de estruturas de jaquetas com auxílio de ferramentas de otimização*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

BRINCKER, R.; KINKEGAARD, P.H.; ANDERSEN, P. (1995). Damage detection in an offshore structure. In: *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, Nashville-TN, USA.

BRINCKER, R.; ANDERSEN, P.; MARTINEZ, M.E.; TALLAVÓ, F. (1996). Modal analysis of an offshore platform using two different ARMA approaches. In: *Proceedings of the 14th International Modal Analysis Conference*, Dearborn-MI, USA.

- CAMPOS, E.J. D. (1995). *Estudos da circulação oceânica do Atlântico Tropical e na região oeste do Atlântico Subtropical Sul*. Tese de Livre Docência, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.
- CHAKRABATI, S.K. (1987). *Hydrodynamic of offshore structures*. Springer-Verlag, Berlin.
- CONNOR, J.J. (2002). *Introduction to structural motion control*. Massachusetts Institute of Technology. Pearson Education.
- CURADELLI, R. O. , RIERA, J. D. , AMBROSINI, R. D. and AMANI, M. G. (2007), Damping: A sensitive structural property for damage detection. *Mecánica Computacional*. Córdoba, Argentina.26: 2395-2413.
- DORATO, P.; ABDALLAH, C.; CERONE, V. (1995). *Linear-quadratic control: An introduction*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc.
- FARRAR, C.R., BAKER, W. E., BELL, T.M., CONE, K.M., DARLING, T.W., DUFFEY, T.A. , EKLUND, A. and MIGLIORI, A., *Dynamic Characterization and Damage Detection in the I-40 Bridge Over the Rio Grande*, Los Alamos National Laboratory report LA-12767-MS, 1994.
- FURTADO, A.T. (1998). A trajetória tecnológica da Petrobras na produção offshore. *Recitec*, 2(2): 76-107.
- GERWICK Jr., B.C. (2007). *Construction of marine and offshore structures*. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton-FL, USA.
- GOEKING, W. (2010). Instalações offshore: Pioneirismo brasileiro. Disponível em: <www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/58-artigos-e-materias-relacionadas/324-instalacoes-offshore-pioneirismo-brasileiro.html>. Acesso em: 23 maio 2013.
- GOLAFSHANI, A.A.; GHOLIZAD, A. (2009). Passive devices for wave induced vibration control in offshore steel jacket platforms. *Scientia Iranica*. 16(6): 443-456.
- HARISH, N.; SUKOMAL, M.; SHANTHALA, B.; SUBBA, R. (2010). Analysis of offshore jacket platform. In: *Proceedings of the National Conference on Sustainable Water Resources Management (SWaRM 20)*, Surathkal, India.

- HAN, D. (2008). *Robust control for offshore steel jacket platforms under wave-induced forces*. MSc thesis, Central Queensland University, Queensland, Australia.
- HU, S.-L.J.; LI, P.; VINCENT, H.T.; LI, H. (2011). Modal parameter estimation for jacket-type platforms using free-vibration data. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **137**(5): 234-245.
- HUANG N. E.; Z. SHEN; S.R. LONG; M. C. WU, (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **454**: 903-995.
- HUANG, N. E.; S. R. LONG; Z. SHEN, (1996). The mechanism for frequency downshift in nonlinear wave evolution. *Adv. Appl. Mech.*, **32**: 59-111.
- HUANG, N. E.; Z. SHEN; S. R. LONG, (1999). "A new view of nonlinear water waves. The Hilbert spectrum." *Annual Rev. Fluid Mech.*, **31**: 417-457.
- JANGID, R.S.; PATIL, C. (2005). Passive control of offshore jacket platforms. *Ocean Engineering*. **32**(16): 1933-1949.
- JENSEN, J.L. (1990). *System identification of offshore platform*. PhD Thesis, University of Aalborg, Denmark.
- JING, H.; YUAN, H.; ZHAO, Y. and YANG, Y. (2008). Applying Hilbert-Huang transform to identifying structural modal parameters. *2008 International Workshop on Education technology and training and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing*. **2**: 617-621.
- KALMAN, R.E. (1960). Contributions to the theory of optimal control. *Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana*, **5**(2):102-119.
- KAWANO, K. (1993). Active control effects on dynamic response of offshore structures. In: *Proceedings of the 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference* (ISOPE 1993), Singapore.
- KAWANO, K.; VENKATARAMANA, K. (1992). Seismic response of offshore platform with TMD. In: *Proceedings of the 10th Earthquake Engineering World Conference*, Rotterdam, The Netherlands.

- KWAKERNAAK, H.; SIVAN, R. (1972). Linear optimal control systems. New York: John Wiley.
- LI, H.J.; HU, S.-L.J.; JAKUBIAK, C. (2003). H_2 active vibration control for platform subjected to wave loading. *Journal of Sound and Vibration*, **263**(4): 709-724.
- LI, P.; LI, H.; HU, S.-L.J. (2010). Estimating modal parameters from free vibration response of jacket-type platforms. In: *Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, China.
- LI, H.; LI, P.; HU, S.-L.J. (2012). Modal parameter estimation for jacket-type platforms using noisy free-vibration data: Sea test study. *Applied Ocean Research*, **37**(1): 45-53.
- LIMA, E.C.P.; ELLWANGER, G.B.; JACOB, B.P. (2002). *Tecnologias de exploração de petróleo*. Apostilha do Curso de Pós-graduação Executiva em Petróleo, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- LIU, J.; LI, S.; SONG, Z.; LI, L.; CHEN, C. (2009). Modal parameters identification of offshore platform structures using HHT Method. In: *Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan.
- LIU, J.; LI, S.; SONG, Z.; LI, L.; CHEN, C. (2012). Modal parameters identification of offshore platform using HHT Method. In: *Proceedings of the 22th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece.
- LIU, P. C., (2000). Wave grouping characteristics in nearshore Great Lakes I, *Ocean Engineering*, 20: 1221-1230.
- LIU, P. C., (2001). Wave grouping characteristics in nearshore Great Lakes II, *Ocean Engineering*, 29: 1415-1425.
- LUBLIN, L.; ATHANS, M. (1996). Linear quadratic regulator control. In: *The control handbook*, Levine, W.S. (Ed.), p.635-650. Boca Raton, Florida: CRC Press and IEEE Press.
- MARTINEZ, M.A.B. (2012). *PEF-2506: Projeto de estruturas marítimas*. Notas de aula, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.

- MA, H.; TANG, G.-Y.; ZHAO, Y.-D. (2006). Feedforward and feedback optimal control for offshore structures subjected to irregular wave forces. *Ocean Engineering*, **33**(8-9): 1105-1117.
- MA, H.; TANG, G.-Y.; HU, W. (2009). Feedforward and feedback optimal control with memory for offshore platforms under irregular wave forces. *Journal of Sound and Vibration*, **328**(4-5): 369-381.
- MÄKILÄ, P.M. (2000) Linear quadratic control revisited. *Automatica*, **36**(1): 83-89.
- MEDEIROS, A.R. (2009). Ancoragem e fundação *offshore*. Dissertação de mestrado. UFRJ, , COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- MENEZES, P.V. (2007). *Metodologias de análise e projeto de estruturas reticuladas na exploração de petróleo offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.
- MORARI, M.; LEE, J.H.; GARCÍA, C.E.(2002). Model predictive control. Prentice-Hall, (No prelo).
- MOSCA, E. (1995). Optimal, predictive and adaptive control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc.
- NETO, J.B.O.; COSTA, A.D. (2007). A Petrobras e a exploração de petróleo offshore no Brasil: Um approach evolucionário. *Revista Brasileira de Economia*, **61**(1): 95-109.
- NEVES, C. F. (2012). Aplicação da transformada de Hilbert-Huang para caracterização da dinâmica costeira – parte 1: grandezas escalares” *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **17**(2): 143-156.
- NISHIMURA, I. (1994). Vibration control of building structures by active tuned mass damper. Thesis. University of Tokyo.
- ODELL, C. (2006). Floating, subsea production increase as fixed installations decline. Disponível em: <www.offshore-mag.com/articles/print/volume-66/issue-11/construction-installation/floating-subsea-production-increase-as-fixed-installations-decline.html>.

OLIVEIRA, L.B.; CALADO, T.C.; SOTOMAYOR, O.A.Z. (2011). *Plataformas de petróleo*. Relatório de Pesquisa, Programa de Recursos Humanos PRH-45, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE, Brasil.

PATEL, M.H. (1989). *Dynamics of offshore structures*. Butterworth, New York.

<http://pedesenvolvimento.com/2009/11/23/jaqueta-da-plataforma-de-mexilhao-segue-hoje-para-a-bacia-de-campos/>

PENG, Z.K.; TSE, P.W.; CHU, F.L.(2005). An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis. *Journal of Sound and Vibration*. **286**(1): 187-205.

PETROBRAS (1998). *Seleção de áreas críticas para inspeção de plataformas fixas de aço*. Norma Técnica N-2267, Petrobras, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

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

SILVA, R.S.L.; MAINIER, F.B. (2008). Decomissionamento de sistemas de produção offshore de petróleo. In: *Anais do IV Congresso Nacional de Excelência em Gestão (IV CNEG)*, Niterói-RJ, Brasil.

SISQUINI, G.R. (2001). *Vida residual de estruturas oceânicas*. Tese de Doutorado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

STANDING, R.G.; WILLS, J.A.B.; SINGH, S. (1990). Wind loading and dynamic response of a floating production platform in waves. In: *Proceedings of the International Conference on Environmental Forces on Offshore Structures and Their Predictions*, London, UK.

SUHARDJO, J.; KAREEM, A. (2001). Feedback-feedforward control of offshore platforms under random waves. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **30**(2): 213-235.

TANNUS D. D. (2013). Identificação de parâmetros modais de sistemas estruturais utilizando a transformada de Wavelet. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Eng. Elétrica. Universidade Federal de Sergipe.

TERRO, M.J.; MAHMOUD, M.S.; ABDEL-ROHMAN, M. (1999). Multi-loop feedback control of offshore steel jacket platforms. *Computers and Structures*, **70**(2): 185-202.

TOLWINSKI, S. (2007). The Hilbert transform and empirical mode decomposition as tools for data analysis. University of Arizona. Program in applied mathematics.

WAFO GROUP (2011). *WAFO – A Matlab toolbox for analysis of random waves and loads*. Lund University, Sweden.

WANG, S.; LIU, J.; LI, Y. (2012). EMD-HHT based structural performance assessment of an offshore platform. In: *Proceedings of the 22th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece.

WU, Z. (2013). Sliding mode control for offshore jacket platforms with external disturbances and nonlinear self-excited wave force. *Journal of Computational Information Systems*, **9**(3): 1237-1245.

ZHANG, B.-L.; HAN, Q.-L.; ZHANG, X.-M.; YU, X. (2012). Integral sliding mode control for offshore steel jacket platforms. *Journal of Sound and Vibration*, **331**(14): 3271-3285.

ZHANG, B.-L.; TANG, G.-Y. (2013). Active vibration H_∞ control of offshore steel jacket platforms using delayed feedback. *Journal Sound and Vibration*, **332**(22): 5662-5677.

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