



FILTRAGEM E INTEGRAÇÃO DE SINAIS TÍPICOS DE ESTRUTURAS OFFSHORE

Marilyn Tamara Seguel Silva

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

Orientadores: Carlos Magluta

Ney Roitman

Rio de Janeiro
Setembro de 2011

FILTRAGEM E INTEGRAÇÃO DE SINAIS TÍPICOS DE ESTRUTURAS OFFSHORE

Marilyn Tamara Seguel Silva

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

Examinada por:

Prof. Carlos Magluta, D. Sc.

Prof. Ney Roitman, D. Sc.

Prof^a. Eliane Maria Lopes Carvalho, D. Sc.

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

SETEMBRO DE 2011

Seguel Silva, Marilyn Tamara

Filtragem e integração de sinais típicos de estruturas offshore / Marilyn Tamara Seguel Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XI, 96 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carlos Magluta

Ney Roitman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2011.

Referencias Bibliográficas: p. 81-83

1. Filtros 2. Integração de Sinais 3. Estruturas *Offshore*. I. Carlos Magluta *et al* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

“Deus não disse que seria fácil, disse apenas que seria gratificante”

*Aos meus pais, Moisés e Vivianne.
Que vieram para este país sonhando com
um futuro melhor para seus filhos*

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado perseverança para ter continuado no mestrado apesar das grandes dificuldades.

Aos meus orientadores pela enorme paciência e grande compreensão ao me guiar nesse longo caminho.

Aos professores do Programa de Engenharia Civil que sempre foram muito solícitos.

Aos meus grandes amigos do meu curso de mestrado pelos longos dias de estudo e ajuda para a concretização desse sonho : Aldo, Alininha, Aninha, Bruno, Diego, Jessick, Luciene, Rosana, Vanessa.

Aos meus amigos de laboratório pela grande amizade e por sempre estarem prontos a me ajudar e apoiar : Flavita, Héctor, Nélon e Anderson. Um muitíssimo obrigado por tudo.

Aos meus amigos e familiares que sempre me apoiaram de longe ou perto e por ter entendido minhas ausências em datas festivas.

Aos Técnicos de laboratório Arthur e Flávio pelos vários dias de ensaio.

E agradeço de todo coração ao meu pai e minha mãe pelo grande incentivo que me foi dado desde que eu era pequenininha.

Aos funcionários do LADEPIS e da COPPE pela ajuda.

À ANP pelo apoio financeiro.

FILTRAGEM E INTEGRAÇÃO DE SINAIS TÍPICOS DE ESTRUTURAS OFFSHORE

Marilyn Tamara Seguel Silva

Setembro/2011

Orientadores: Carlos Magluta

Ney Roitman

Programa: Engenharia Civil

Apesar do avanço tecnológico dos últimos anos, algumas estruturas *offshore* têm apresentado falhas ocorridas em condições normais de operação. Para analisar o comportamento deste tipo de estrutura, estas têm sido monitoradas com unidades de medição inercial, as quais, em geral, permitem medir 5 ou 6 graus de liberdade (três de aceleração lineares e 2 ou 3 de velocidades angulares). Os deslocamentos em relação a um referencial fixo sobre a superfície da Terra podem ser obtidos por uma integração iterativa, típica dos problemas de navegação inercial. A principal dificuldade é que os sinais medidos geralmente estão submetidos a uma série de ruídos que impedem a utilização direta das formulações convencionais.

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver, implementar e avaliar metodologias para estimativa de deslocamentos através da integração e filtragem de sinais com baixas frequências a partir de sinais de aceleração e de velocidades angulares. A metodologia implementada é avaliada através de sinais simulados e de testes experimentais realizados em laboratório em uma mesa vibratória e em um pêndulo com o uso de filtros convencionais (FIR e IIR) e não convencionais (*Spline*, FFT, *Wavelet* e ajuste de polinômios).

Dos diversos filtros analisados os que se mostraram mais adequados para alguns sinais típicos de estruturas *offshore* analisados nesta pesquisa, são os dos tipos *Wavelet*, *Spline* e FFT.

Palavra-chave: estruturas offshore, integração de sinais, filtros

FILTERING AND INTEGRATION OF TYPICAL SIGNALS OF OFFSHORE STRUCTURES

Marilyn Tamara Seguel Silva

September/2011

Advisors: Carlos Magluta

Ney Roitman

Program: Civil Engineering

Despite the technological advance in the last few years, some offshore structures have presented failures during operation. To analyze the behavior of this type of structure, they have been monitored with inertial measurements units, which in general, allow measuring 5 or 6 degrees of freedom (3 linear acceleration and 2 or 3 angular velocities). The displacements, referring to a fixed referential, can be obtained through an iterative integration, typical of the problems of inertial navigation. The main difficulty is that the measured signals are generally submitted to a series of noises that prevent the direct use of the conventional formulations.

This research aims to develop, implement and evaluate methodologies to predict displacements. This is accomplished integrating and filtering low frequency signals from acceleration and angular velocities signals. The developed methodology is evaluated through simulated signals and experimental tests accomplished in laboratory in a shaking table and in a pendulum using conventional filters (FIR, IIR) and non conventional ones (*Spline*, FFT, *Wavelet*, polynomial adjustment).

For typical offshore structures signals, among the analyzed filters, the ones that showed to be more suitable were *Wavelet*, *Spline* and FFT.

Keywords: offshore structures, signals integration, filters

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Motivação e Objetivos	1
1.2 – Organização do Texto	5

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO GERAL SOBRE FILTROS.....	6
2.1 - Introdução.....	6
2.2 - Filtros Utilizados.....	8
(a) Filtros do tipo FIR.....	8
(b) Filtros do tipo IIR.....	11
(c) Filtros baseados no ajuste de uma função Spline.....	11
(d) Filtros baseados na Transformada de Wavelet.....	14
(e) Filtros baseados na Transformada de Fourier.....	17
(f) Filtros baseados no ajuste de uma função polinomial.....	18

CAPÍTULO 3

AValiação DOS FILTROS.....	19
3.1- Avaliação dos filtros através da simulação numérica.....	20

3.2 – Avaliação dos filtros através de testes experimentais.....	26
3.2.1 – Análises com sinais harmônicos.....	31
(a) – Frequência 0.1 Hz.....	31
(b) – Frequência 0.2 Hz.....	32
(c) – Frequência 0.4 Hz.....	33
(d) – Frequência 0.6 Hz.....	34
(e) – Frequência 1.0 Hz.....	35
(f) – Frequência 2.0 Hz.....	35
3.2.2 – Análises com sinais randômicos.....	37
(a) – Frequência 0-0.5Hz.....	37
(b) – Frequência 0-1.5 Hz.....	38

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO DOS FILTROS ATRAVÉS DA ANÁLISE DAS RESPOSTAS DE UM PÊNDULO.....40

4.1 – Descrição do Aparato de Ensaio e da Instrumentação	40
4.2 – Análise das Respostas do Pêndulo.....	46
4.2.1 – Metodologia Utilizada para análise.....	46
4.2.2 –Análise do Sinal da Garrafa.....	52

CAPÍTULO 5

COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES.....79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....81

ANEXO1: Comparação entre os deslocamentos obtidos com o flexímetro e através da dupla integração do acelerômetro utilizando-se os filtros apresentados.....84

ANEXO 2: Parâmetros dos filtros para obtenção do deslocamento global e deslocamento relativo das garrafas fixa e móvel.....94

1. INTRODUÇÃO

1. 1. Motivação e Objetivo

Ao longo dos anos, novas tecnologias têm sido desenvolvidas dentro da engenharia, surgindo estruturas cada vez mais esbeltas e tornando os projetos estruturais e os processos construtivos de grande complexidade. A indústria petrolífera no Brasil tem tido rápido desenvolvimento principalmente na área de estruturas que operam em águas profundas e ultra-profundas. Apesar do avanço tecnológico, as estruturas *offshore* têm apresentado falhas produzidas em condições normais de utilização. A detecção prematura dessas falhas ou danos pode ser de grande auxílio para tentar evitar acidentes que possam comprometer a segurança das estruturas, e assim reduzir os riscos ambientais e a perda de vidas humanas. Para realizar essa detecção, é fundamental que essas estruturas passem a ser monitoradas continuamente para que variações em suas características físicas possam ser detectadas prematuramente.

Dentro dessa linha de ação, o objetivo desta pesquisa é desenvolver, implementar e avaliar metodologias para a estimativa de deslocamentos e rotações em estruturas tais como: *risers*, dutos, etc.. a partir de sinais de aceleração e de velocidades angulares. Esses sinais são coletados a partir de uma unidade de medição inercial. Na Figura 1.1, é mostrada uma vista de uma unidade inercial, que mede 43 cm de comprimento e tem 30 cm de diâmetro.



Figura 1.1- Unidade inercial [1]

Essas unidades podem ser instaladas em estruturas como mostram as Figura 1.2 e Figura 1.3. Na Figura 1.2 (a), é mostrada uma estaca torpedo, a qual é bastante utilizada atualmente para ancoragem de plataformas semi-submersíveis e FPSOs, possibilitando sua instalação em águas com profundidades superior a 2000 m. Conforme pode ser visto na Figura 1.2 (b), as estacas torpedo são lançadas com a ajuda de um rebocador e para determinar as características da ancoragem, esta estaca é monitorada utilizando uma unidade de medição, a qual neste texto também é denominada de garrafa. Para obtenção destas características, é necessário integrar as velocidades angulares e as acelerações medidas de maneira a obter a trajetória da estaca, a profundidade de penetração e, finalmente, o ângulo final de assentamento.



(a)



(b)

Figura 1.2- Unidade de Medição em Estacas torpedo [2]

Outro exemplo de utilização dessas unidades de medição é a instalação em *risers*, que são dutos que fazem a ligação entre os poços de petróleo, em solo marinho, e as plataformas ou navios, na superfície. Os *risers* são considerados como uma das partes críticas de um sistema de exploração *offshore*. Na Figura 1.3 são mostradas duas unidades de medição fixadas ao longo de um *riser* de exploração, visando medir os seus deslocamentos provenientes das ondas e correntes marinhas, além do próprio movimento da plataforma. Além disto, para esta aplicação, foi necessária a estimativa do deslocamento relativo entre as duas garrafas, para que fossem estimados os desgastes

junto ao *Bend Stiffness* da plataforma. Deve-se destacar que a vibração induzida por vórtices (VIV) em *risers* vem sendo matéria cada vez mais frequente de pesquisa, principalmente para permitir um melhor entendimento do comportamento. Para tanto se torna indispensável à monitoração destas estruturas através de unidades de medição, a fim de obter dados que possibilitem a calibração de modelos analíticos e numéricos.

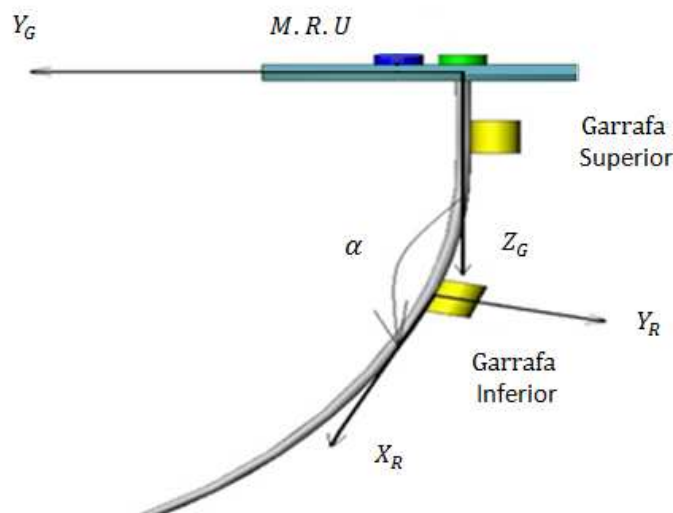
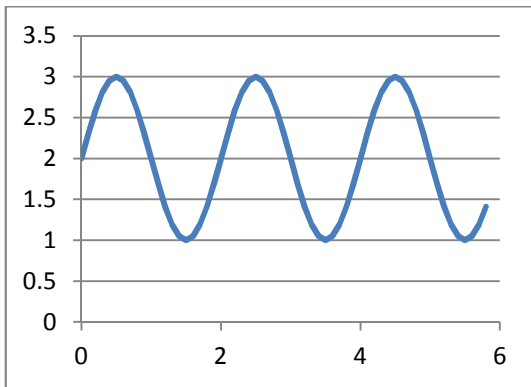


Figura 1.3- Unidades de Medição em *Risers* [3]

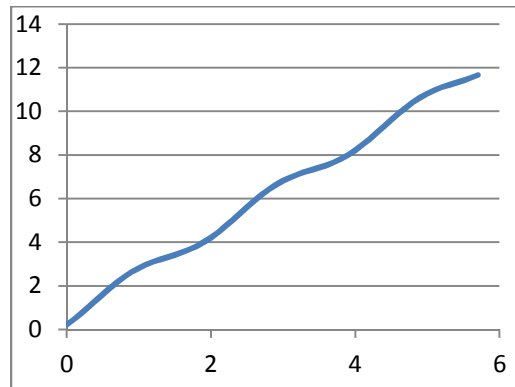
Cada unidade de medição permite a medição de cinco graus de liberdade: três de aceleração linear e dois de velocidade angular. Os sinais das velocidades angulares providos pelos girômetros permitem a correção da direção dos acelerômetros em relação a um referencial inercial. Os deslocamentos corrigidos em relação a um referencial fixo sobre a superfície da Terra podem ser obtidos por uma integração iterativa, típica dos problemas de navegação inercial. A principal dificuldade é que os sinais medidos geralmente estão associados a ruídos e componentes de baixa frequência dentro da faixa de interesse que impedem a utilização direta das formulações convencionais. Estes componentes de baixas frequências dos sinais podem levar a integração a um resultado inconsistente. Isso acontece, pois as baixas frequências tendem a serem amplificadas quando a integração é realizada. Um exemplo simples de como isso ocorre pode ser entendido através de um sinal harmônico associado a uma constante, isto é;

$$y = a \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + b$$

A Figura 1.4(a) ilustra este sinal enquanto a Figura 1.4(b) a sua integral. Nota-se claramente que quando é feita a integração as baixas frequências, neste caso a parcela constante, passam a ser predominante no sinal, enquanto as mais altas, representadas pelo sinal harmônico ficam praticamente imperceptíveis. A solução para este problema é retirar do sinal as componentes de baixa frequência que não são interessantes para análise mantendo-se somente as de interesse. Este processo pode ser realizado através de filtros do tipo passa alta. O grande problema para aplicação destas técnicas é que as frequências de interesse nos sinais oriundos das medições na área *offshore* são muito próximas a zero, fazendo com que este processo de filtragem seja difícil de ser realizado. O principal objetivo desta pesquisa é avaliar dentro das metodologias de filtragem existentes as que atendam às necessidades dos sinais usualmente medidos em estruturas *offshore*.



(a) Função senoidal associada a uma constante



(b) Função integrada

Figura 1.4 – Exemplo de uma função senoidal associada a um valor constante e de sua integral

1. 2. Organização texto

Apresenta-se no Capítulo 2 uma descrição dos filtros utilizados neste trabalho, os quais estão divididos em duas categorias: convencionais e não-convencionais. Os filtros convencionais que se encontram na literatura são os filtros IIR (*Infinite Impulse Response*) e FIR (*Finite Impulse Response*), enquanto os não-convencionais seriam os baseados no ajuste de funções do tipo Spline, polinomiais e nas transformadas de Fourier e *Wavelet*.

No Capítulo 3, apresenta-se uma avaliação dos filtros implementados através de simulações numéricas e de testes experimentais realizados em uma mesa vibratória. Foram analisados sinais harmônicos com frequência de 0.1 Hz até 2.0 Hz e sinais randômicos com faixas de frequência de 0 a 0.5 Hz até 0 a 1.5 Hz.

No Capítulo 4, é mostrada uma avaliação da metodologia desenvolvida em uma situação mais próxima da real. Foi realizada uma série de ensaios em um pêndulo, o qual pode ser movido lentamente ou deixado em vibração livre, com capacidade de gerar movimentos rotacionais e axiais.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentados comentários finais sobre as análises realizadas e as sugestões para trabalhos futuros. Deve-se ressaltar que dos diversos filtros analisados, os que se mostraram mais adequados para a aplicação são os dos tipos *Wavelet*, *Spline* e FFT.

2. Descrição Geral sobre Filtros

2.1 – Introdução

Os filtros utilizados nesta pesquisa são digitais, isto é, são filtros que irão atuar após a aquisição dos sinais. Esta opção permite que sejam avaliados diversos tipos de filtros utilizando-se os mesmos sinais de entrada, e esta hipótese não impede que no futuro estes filtros possam ser integrados diretamente ao sistema de aquisição de dados.

Cada filtro impõe certo tipo de processamento sobre o sinal original, causando uma modificação e produzindo assim outro sinal. Os filtros digitais podem ser usados, por exemplo, para segregar informações de faixas de frequências diferentes, para remoção de ruído em altas frequências ou ainda para ressaltar determinadas informações do sinal

É possível construir diversos tipos de filtros dependendo da faixa de frequências que se deseja filtrar. Os filtros de um modo geral podem ser do tipo passa-baixa, passa-alta, passa-faixa ou rejeita faixa. A Figura 2.1 ilustra esses tipos de filtros, cujas características são descritas a seguir:

- Passa-baixa: deixa passar as baixas frequências e atenua as altas frequências.
- Passa-alta: deixa passar as altas frequências e atenua as baixas frequências.
- Passa-faixa: permite a passagem das frequências de uma determinada faixa e atenua as frequências fora dessa faixa.
- Rejeita-faixa: não permite a passagem de sinais cujas frequências se encontram compreendidas entre a frequência de corte superior e inferior, permitindo a passagem do sinal fora dessa faixa.

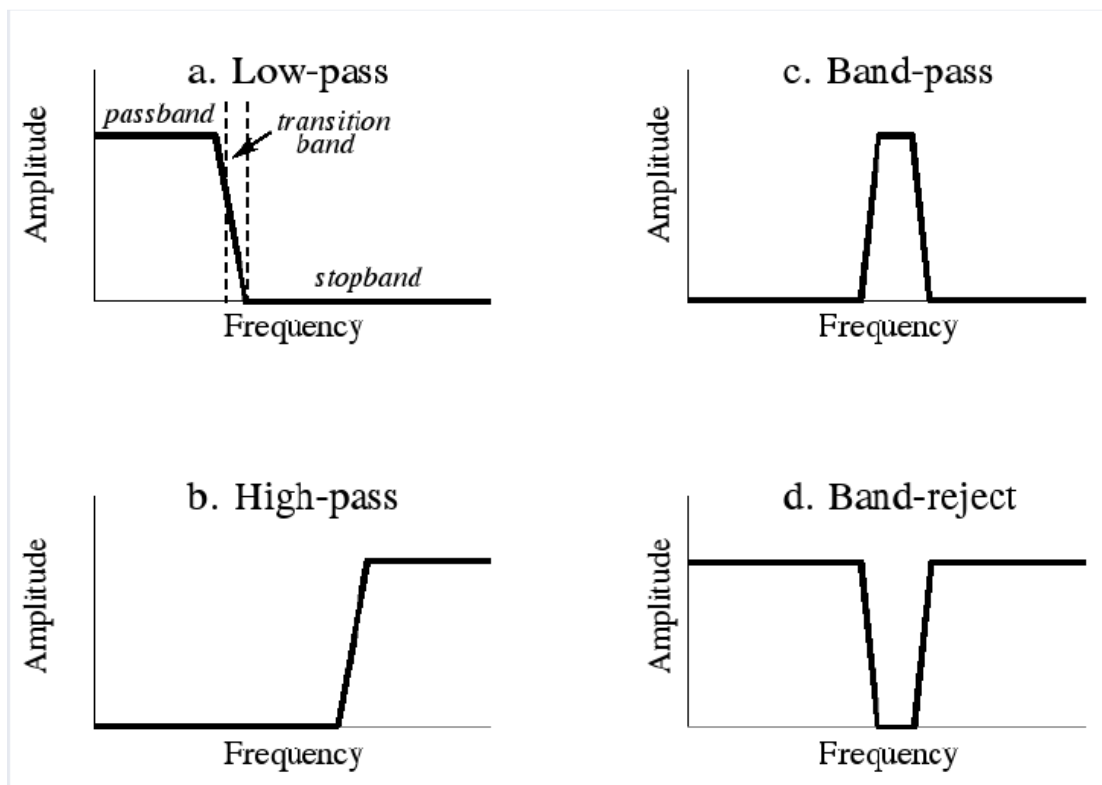


Figura 2.1- Tipos de filtros ideais no domínio da frequência [4].

Como no presente estudo, o objetivo é eliminar as amplitudes que estão associadas às baixas frequências, será utilizado o filtro do tipo passa alta, ilustrado em detalhes na Figura 2.2.

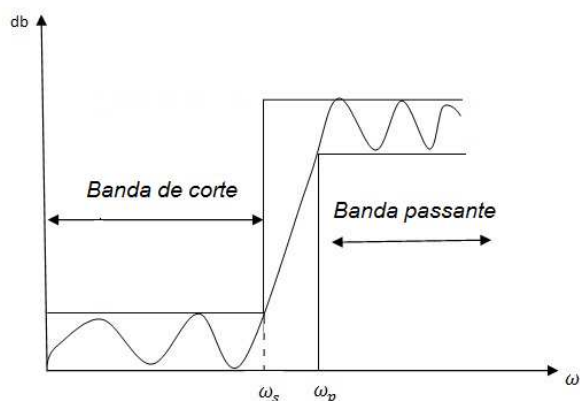


Figura 2.2 – Algumas características de um filtro passa-alta

Nesta figura se pode observar as características fundamentais dos filtros:

- - *Stop band* ou banda de corte: é a faixa de frequências, entre limites especificados, através da qual o filtro não permite que o sinal passe, ou tenha uma atenuação especificada;
- - *Pass band* ou banda passante: é o conjunto de valores de frequência que podem ser assumidos por um sinal sem que este seja atenuado ao passar por um filtro;
- ω_p e ω_s são as frequências limites da faixa de transição entre a banda de corte e a banda passante.

Outra característica importante nos filtros é a frequência de corte, também conhecida como frequência a meia potência. No caso de um filtro passa-alta esta pode ser definida como sendo a frequência abaixo da qual a potência na saída do sistema é reduzida a metade da potência da banda passante. Em termos de amplitude isto corresponde a uma redução de 70,7% do valor da banda passante. Em decibéis essa redução corresponde a uma atenuação de -3dB, a frequência de corte também é conhecida como frequência de -3dB.

2.2 –Filtros Utilizados

A fim de avaliar quais os filtros mais adequados para cortar as baixas frequências foram estudados alguns tipos de filtros, os quais estão divididos em duas categorias: os convencionais e os não-convencionais. Os filtros convencionais que se encontram na literatura são os filtros FIR (*Finite Impulse Response*) [4][5][6][7][8][9] e IIR (*Infinite Impulse Response*) [5][8][10][11][12], enquanto os não-convencionais seriam os baseados no ajuste de funções do tipo *Spline* [13][14][15][16][17][18], *Wavelet* [19][20][21][22][23][24][25] e polinomiais e nas transformadas de Fourier [12][26][27][28]. Apresenta-se, a seguir, uma breve explicação de como funciona cada filtro usado nessa pesquisa.

a) **Filtro do Tipo FIR**

Os filtros *Finite Impulse Response* (FIR) ou de resposta ao impulso é um tipo de filtro digital caracterizado por uma resposta ao impulso que se torna nula após um tempo finito. Esses tipos de filtro são não recursivos e são definidos pela Equação 2.1:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k x[n - k] \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde:

$x(n)$ é o sinal de entrada do filtro,

$y(n)$ é o sinal de saída do filtro,

b_k são os coeficientes do filtro.

O filtro é constituído por vetores de coeficientes (b_k) e o processo de filtragem é simplesmente a convolução do sinal de entrada com os coeficientes do filtro. Na prática, o número de produtos que se pode realizar na convolução é um número finito, então é assumido que o comprimento do vetor de coeficientes do filtro é muito menor que o número de amostras do sinal [4]. Desta forma, a Equação 2.1 fica:

$$y[n] = \sum_{k=-N}^N b_k x[n - k] \quad (\text{Eq. 2.2})$$

onde N é a ordem do filtro.

Para a implementação desses filtros digitais em tempo real, existe outra dificuldade, pois não podemos requisitar que o valor da saída no instante atual dependa de valores futuros da entrada [7]. Desta forma, o filtro deve ser causal, conduzindo a Equação 2.2 a:

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k x[n - k] \quad (\text{Eq. 2.3})$$

A diferença entre os filtros de resposta finita (FIR) e de resposta infinita (IIR) é que enquanto o primeiro tem valores nulos após um determinado tempo, o segundo pode continuar respondendo indefinidamente, já que estes possuem uma realimentação.

Existem três técnicas [8] para projetar filtros desse tipo, sendo que no presente trabalho é empregada a técnica de resposta em frequência. Denominando $H_d(\omega)$ como a resposta em frequência para um filtro FIR, sua resposta ao impulso pode denotar-se por $h_d[n]$, sendo estas funções interligadas pelas equações a seguir:

$$H_d(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h_d[n] e^{-j\omega nT} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

$$h_d[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(\omega) e^{j\omega nT} d\omega \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Como $H_d(\omega)$ é uma função periódica as Figuras 2.4 e 2.5 definem uma série infinita de Fourier. Devido a limitações práticas de cálculo computacional, a Equação 2.5 pode ser reescrita como:

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^M h[n] e^{-j\omega nT} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

A Equação 2.6 é uma série finita de Fourier e é uma aproximação de $H_d(\omega)$. Para implementar um filtro FIR é necessário truncar a resposta ideal $h_d[n]$ fora do intervalo, $0 \leq n \leq M$ para obter $h[n]$:

$$h[n] = \begin{cases} h_d[n], & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{outros valores de } n \end{cases}$$

onde M indica o número de coeficientes usados pelo filtro e conseqüentemente o número de convoluções.

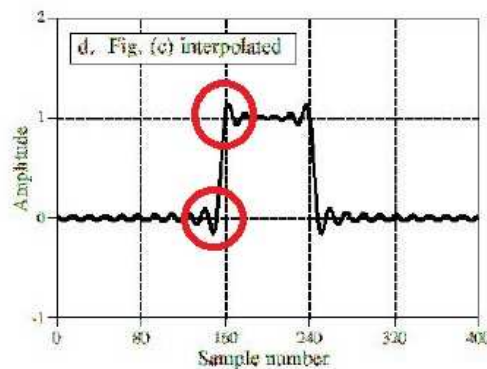


Figura 2.3 – Exemplo efeito Gibbs [29]

Segundo [29] o truncamento nas séries de Fourier provoca o efeito Gibbs em $H(\omega)$, que são ondulações antes e depois de qualquer descontinuidade. Na Figura 2.3 é mostrado esse efeito, o qual tende a aumentar principalmente se a função $H_d(\omega)$ apresentar descontinuidades. Como os filtros são idealmente descontínuos nas bordas da banda de transição, esse truncamento na resposta ao impulso pode gerar uma resposta inaceitável. Conforme mencionado anteriormente esse truncamento é realizado através do uso de janelas, as quais têm por objetivo tentar atenuar essas descontinuidades.

b) Filtro do Tipo IIR

Com relação à resposta ao impulso, um filtro que tenha como característica principal a realimentação, ou seja, a saída do filtro depende em maior ou menor grau dos valores de suas amostras passadas, esse tipo de filtro é denominado IIR (*Infinite Impulse Response* ou Resposta Infinita ao Impulso). Esse filtro é do tipo recursivo, e seu sinal de saída é função tanto do sinal de entrada, quanto do de saída. Para um filtro recursivo causal a sua equação de diferenças é dada por [4][10]:

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k x[n - k] + \sum_{k=0}^N a_k [n - k] \quad (\text{Eq. 2.7})$$

É possível verificar facilmente, comparando as Equações 2.3 e 2.7, que os filtros não recursivos são um caso particular dos recursivos onde os coeficientes a_k são iguais a zero, ou seja, não há re-alimentação.

Apesar de o filtro ter infinitos valores, a ordem do filtro é definida como o maior valor entre as entradas e saídas anteriores. Como o filtro é re-alimentado é possível conseguir bons resultados de filtragem com número de coeficientes reduzidos, porém isso faz com que ocorram problemas como distorção de fase e instabilidade. De forma geral, sabe-se que quanto maior o número de coeficientes melhor é a resolução do filtro. Assim como nos filtros FIR, a escolha cuidadosa dos coeficientes permite o projeto adequado de um filtro IIR. A vantagem dos filtros IIR sobre os filtros FIR é que eles requerem uma quantidade menor de coeficientes para resultados similares.

A função de transferência do filtro pode ser obtida pela aplicação da transformada Z. O resultado é a função $H(z)$ que relaciona a transformada Z da saída, $Y(z)$, e a transformada Z da entrada, $X(z)$, sendo N a ordem do filtro:

$$Y(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_N z^{-N}} X(z) = H(z) \cdot X(z) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

c) Filtro Baseado no ajuste de uma função *Spline* Tensionada

A origem do nome *Spline* vem de uma régua elástica, usada em desenhos de engenharia, que pode ser curvada de forma a passar por um dado conjunto de pontos coordenados (x_i, y_i) , que tem o nome de *Spline*. O termo *Spline* é designado na

matemática para definir curvas especiais formadas por segmentos de polinômios [14], que são ligados entre si através de pontos chamados nós, como se fosse uma interpolação. Quanto maior o número de nós, a *Spline* se torna mais flexível, podendo limitar-se a área onde se deseja mais nós, ou seja, maior flexibilidade. Essa é uma técnica de aproximação que consiste em se dividir o intervalo de interesse em vários subintervalos e interpolar, da forma mais suave possível, nestes subintervalos com polinômios de pequeno grau. Essa técnica é muito usada na computação gráfica, tanto em fotografia como em exames médicos, buscando fidelidade ao objeto modelado, podendo preservar muitas propriedades matemáticas e geométricas das curvas e superfícies. Antigamente, a forma final aproximada ou completa de uma curva em um projeto, como por exemplo, o casco de um navio ou o perfil da fuselagem de um avião, podia ser obtida através de um processo chamado *lofting*, que consistia na utilização de uma barra longa e estreita fabricada com um material resistente a esforços transversais e longitudinais. Esta barra era modelada no formato da curva desejada aplicando-se tensões ao longo da barra através da introdução de pesos e molas denominados *ducks* [16], conforme mostrado na Figura 2.4.

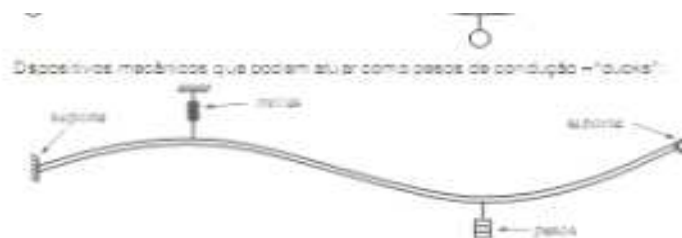


Figura 2.4 – Exemplo de dispositivos mecânicos utilizados antigamente para conformação de superfícies [16].

A função *Spline* tem polinômio de grau m e ordem (coeficientes) $m+1$, tendo suas derivadas contínuas até certa ordem para que as curvas sejam suaves e contínuas se aproximando ao máximo das curvas originais [16]. A escolha da ordem depende de quantas derivadas serão necessárias para representar a curva. Por exemplo, para que sejam garantidas as condições para a segunda derivada, seria necessário a utilização de um polinômio de ordem 6, conduzindo assim, que sua segunda derivada seja um polinômio de ordem 3, tornando a *Spline* cúbica.

Seja S uma função que é chamada de *Spline* cúbica, sendo seu domínio um intervalo $[a, b]$, tal que se $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ em cada subintervalo $[x_i, x_{i+1}]$ e um conjunto de números reais y_i , então toda função $f(x)$ tem segunda derivada contínua em $[a, b]$ tal que $f(x_i) = y_i$, onde $i=0,1,\dots,n$ a função *Spline* tem nós em x_i e $S''(f,a) = S''(f,b) = 0$, minimiza a integral da Equação 2.9.

$$\int_a^b |f''(x)|^2 dx \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Essa é uma boa aproximação da integral da raiz de curvatura de uma curva $y=f(x)$. Esse teorema é freqüentemente chamado também de propriedade de curvatura mínima.

A *Spline* por ter essas características também serve como filtro. A *spline* tensionada é um filtro passa-baixa que corta as altas frequências, mas quando este sinal é subtraído do sinal original, o resultado obtido é equivalente a um filtro do tipo passa-alta, eliminando as componentes de baixas frequências.

Segue a definição de uma *Spline* tensionada dada por BOOR [17]. Dada a aproximação de valores de $y_i = g(x_i) + \varepsilon_i$ de uma suposta função suavizada g nos pontos x_1, \dots, x_n , e uma estimativa δy_i da variância em y_i , tenta-se recuperar a função g desses dados por construção da função $f = f_p$, a qual de um dado parâmetro $p \in [0,1]$ (a ser escolhido arbitrariamente), minimiza a Equação 2.10 sobre todas as funções f com m derivadas.

$$p \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\delta y_i} \right)^2 + (1 + p) \int_{x_1}^{x_n} \left(f^{(m)}(t) \right)^2 dt \quad (\text{Eq. 2.10})$$

A minimização da Equação 2.10 estabelece uma espécie de compromisso entre a vontade de ficar próximo dos dados fornecidos e de obter uma função suave, e a escolha de p depende de qual desses dois objetivos conflitantes é mais importante. A solução f_p acaba por ser uma *spline* de ordem $k = 2m$ com nós em x_2, \dots, x_{n-1} , e satisfazendo as condições naturais finais.

$$f_p^{(j)}(x_1) = f_p^{(j)}(x_n) = 0, \text{ para } j = m, \dots, k - 2 \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Assim, BOOR afirma que para a minimização da Equação 2.10 basta somente obedecer a Equação 2.11, uma vez que para qualquer escolha de f , a substituição da sua interpolação em x nas splines naturais de ordem k para f na Equação 2.10, deixa a soma inalterada, enquanto que possivelmente diminui a integral, pela propriedade da interpolação de *Spline*.

A principal dificuldade com esta técnica é que a tensão imposta não tem uma representação clara em frequência, além disto, a tensão leva em consideração o tamanho do sinal. Desta forma, para utilização desta técnica é necessário um estudo paramétrico para avaliar a frequência de corte que está sendo imposta ao sinal para cada análise realizada,.

d) Filtro Baseado na Transformada de Wavelet

A primeira citação do termo wavelet foi realizada por Alfred Haar em 1909 [24], e por décadas este tema não recebeu muita atenção. Somente a partir dos anos 70 é que os pesquisadores voltaram a dar atenção cuidadosa passando a utilizar este conceito com sucesso em diversas aplicações.

O desenvolvimento da teoria de *Wavelet* apresenta duas grandes áreas sendo uma denominada por Transformada de *Wavelet* Continua (CWT) a qual permite construir, de uma maneira simples, uma infinidade de distribuições tempo-frequência partindo de uma única função chamada núcleo da distribuição. A outra área está voltada para o desenvolvimento de aproximações de funções através de bases ortogonais finitas no tempo, conhecida como Transformada de *Wavelet* Discretas (DWT) como é mostrado na Equação 2.12.

$$DWT_x^\psi = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum x(t) \Psi(2^j k - n) dt \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Desta forma, ao contrário da transformação discreta de Fourier, a DWT não é realmente uma versão discreta da transformada de *wavelet* contínua. Em vez disso, a DWT é funcionalmente diferente da transformada *wavelet* contínua (CWT). Para implementar o DWT são aplicados ao sinal uma série de filtros passa-alta, a fim de analisar as frequências altas, e depois, por uma série de filtros passa-baixa para se

analisar as baixas frequências, os quais são seguidos de uma sub-amostragem. Este processo pode ser representado matematicamente por:

$$y_{high}[k] = \sum_n x[n].g[2k - n] \quad (\text{Eq. 2.13})$$

$$y_{low}[k] = \sum_n x[n].h[2k - n] \quad (\text{Eq.2.14})$$

onde, $y_{high}[k]$ e $y_{low}[k]$ são respectivamente as saídas dos filtros passa-alta e passa-baixa, após a realização de uma re-amostragem do sinal saltando um ponto, o que conduz o sinal à metade dos pontos. Esta operação dobra a resolução da frequência, já que a banda de frequência do sinal obtido cobre somente a metade da banda de frequência anterior. Este processo pode ser repetido para realizar as decomposições seguintes. Para cada um dos níveis de decomposição, a filtragem e a re-amostragem vão reduzir à metade o número de amostras (e, portanto a resolução temporal) e dividir por dois a banda de frequências recoberta (e, portanto dobrar a resolução em frequência). A Figura 2.5 ilustra este procedimento, onde G_0 e G_1 são, respectivamente, os filtros passa-alta e passa-baixa. A Figura 2.6 ilustra um filtro típico que pode ser utilizado nesse processo.

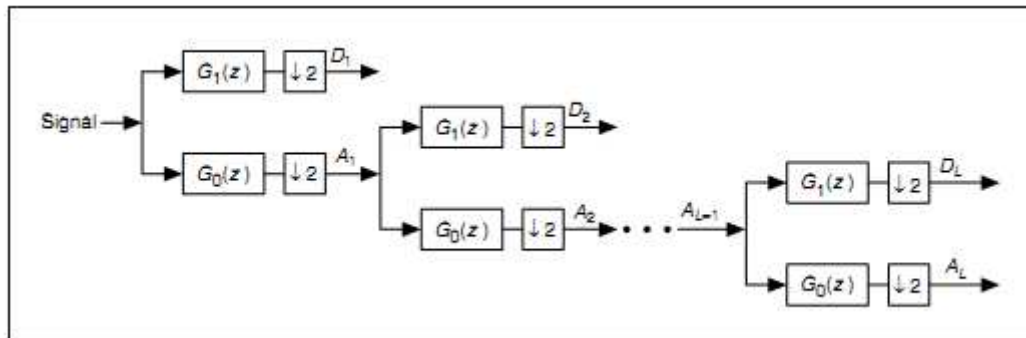


Figura 2.5 - Algoritmo da DWT –[21]

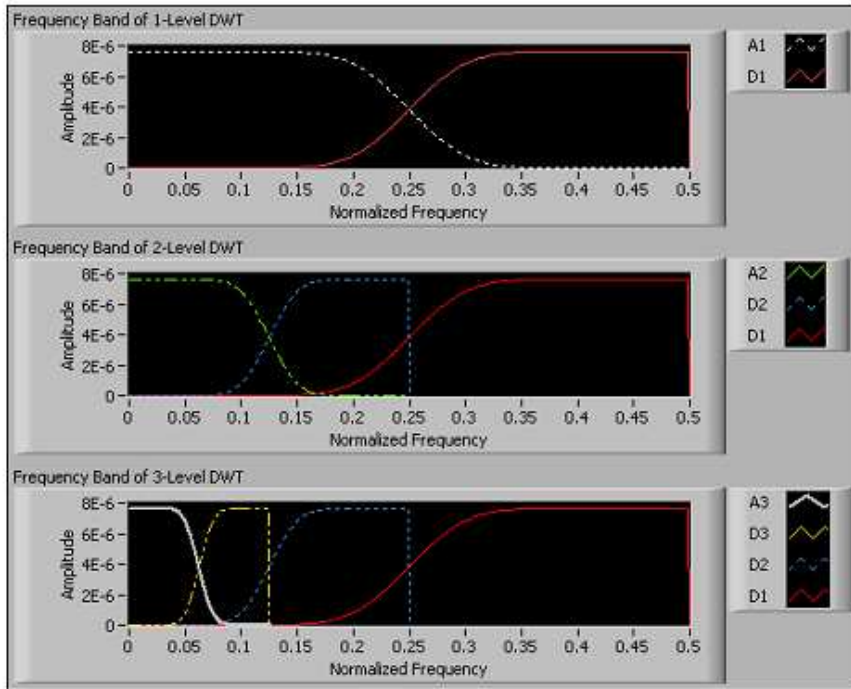


Figura 2.6 – Exemplo dos Filtros utilizados na DWT [21]

De posse dos coeficientes A_i e D_i é possível reconstruir o sinal $X(n)$ sem nenhum tipo de perda conforme ilustra a Figura 2.7. O conceito para filtrar o sinal é fazer com que parte dos coeficientes obtidos sejam nulos, conduzindo assim, que o sinal reconstruído tenha somente parte das informações iniciais.

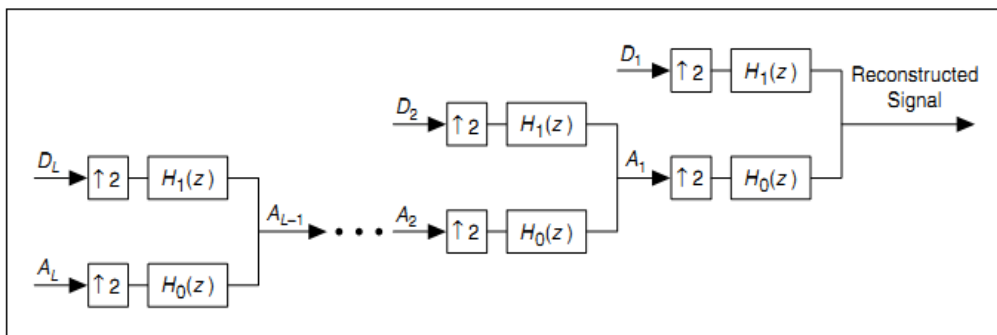


Figura 2.7 – Algoritmo da Inversa da DWT [21]

e) **Filtro Baseado na Transformada de Fourier**

A Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Digital Fourier Transform*) é de grande importância para uma variedade de aplicações, como por exemplo, o processamento digital de imagens, a resolução de equações diferenciais parciais e também algoritmos para multiplicação rápida de números inteiros muito grandes [27].

A transformada Fourier é uma ferramenta matemática que permite transformar um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência. Para diminuir o tempo de processamento do algoritmo da DFT foi proposto um método conhecido como Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform) apresentado por COOLEY; TUKEY em 1965 [28]. Além de diminuir sensivelmente o tempo de processamento, a FFT também aumenta a acurácia da transformada.

A FFT, também chamada algoritmo Cooley-Tukey, tem como idéia básica dividir o sinal original em sinais menores, a fim de diminuir o esforço computacional. Quando se realiza uma DFT de um sinal com N pontos, o número de operações necessárias para o seu calculo é proporcional a N^2 . Esse número é bastante diminuído quando se divide o sinal em vários sinais menores. A FFT se propõe a obter o mesmo resultado realizando da ordem de $N \cdot \log_2 N$ operações [12]. Isso ocorre porque é assumido que N é da forma $N = 2^n$, sendo n inteiro positivo.

Considerando N amostras de um sinal no domínio do tempo denotado por $f(k)$, onde $k = 0,1,2, \dots, N-1$, a DFT no domínio da frequência, $F(u)$, onde $u = 0,1,2, \dots, N - 1$, é dada por:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) \cdot e^{-\frac{j2\pi x}{N}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Logo, a transformada inversa de Fourier é:

$$f(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(u) \cdot e^{\frac{j2\pi x}{N}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

A DFT, $F(u)$, da seqüência original com N pontos pode ser obtida a partir das DFT's de duas seqüências com a metade dos pontos, sendo uma relativa aos índices pares e outra aos ímpares. Como o número de pontos originais N é uma potência de 2, cada seqüência com metade dos pontos pode ser novamente repartida em seqüências com $\frac{1}{4}$ dos pontos, e assim sucessivamente, até que a última seqüência tenha apenas um ponto. A FFT combina as várias DFT's obtidas de uma forma engenhosa e obtém a DFT do sinal original.

O conceito para filtrar o sinal seria transformar o sinal medido para o domínio da freqüência, anular as amplitudes associadas à faixa de freqüência que se deseja eliminar e retornar com o sinal para o domínio do tempo. Este processo seria equivalente a utilização de um filtro ideal conforme pode ser visto na Figura 2.1.

f) **Filtro Baseado no ajuste de uma função Polinomial**

A idéia desse filtro é bastante simples e semelhante ao da *Spline*, só que neste caso a função ajustada é um polinômio de grau N . Este filtro, também conhecido como filtro de tendência, é ideal para certas tendências indesejadas no sinal conforme ilustrada na Figura 1.4(b), no entanto, este filtro por ser aplicado a todo o sinal. Em certas situações ele não apresenta bons resultados, como será ilustrado nos próximos capítulos.

3. AVALIAÇÃO DOS FILTROS

Com o objetivo de avaliar os filtros implementados, foram utilizadas duas metodologias, sendo uma através de simulações numéricas e outra através de testes experimentais. Esses procedimentos estão descritos nos próximos itens deste capítulo.

O objetivo das simulações numéricas foi analisar as características de cada filtro para diferentes tipos de condições impostas. Para isto, foi utilizado um programa em LabView, que tem a função de gerar um sinal aleatório baseado em um espectro fornecido pelo usuário. Este sinal foi filtrado pelos tipos de filtros descritos no Capítulo 2 e, posteriormente, foi realizada uma análise em frequência. Este procedimento foi realizado de forma que se tivesse controle sobre todos os dados do sinal gerado, tais como: frequência imposta, número de pontos do sinal a ser discretizado e o tamanho do sinal.

A análise foi realizada no domínio da frequência através de Funções de Transferências, as quais correlacionam o sinal original com os filtrados. Para estimar a Função de Transferência, o sinal foi dividido em várias amostras com superposição de 67%. Para cada trecho, foi realizada a transformada de Fourier do sinal, sendo então realizada a estimativa das funções de auto-correlação e de correlação-cruzada. De posse destas funções, foi obtida a função de transferência minimizando a influência dos ruídos através da aproximação do tipo “Hv”. Para cada um dos sinais filtrados, podem ser mostrados o sinal no tempo, o seu espectro e a função de transferência (amplitude e fase).

A segunda metodologia teve como objetivo avaliar a eficiência dos filtros e dos métodos de integração em uma situação mais próxima da real. Para isto, foram realizados ensaios utilizando-se uma mesa vibratória instrumentada através de acelerômetros e de sensores de deslocamento. O propósito do experimento era processar os sinais de aceleração e depois comparar o resultado obtido das filtragens e dupla integração com os deslocamentos medidos.

3.1 – Avaliação dos Filtros através de Simulações Numéricas

Com o objetivo de estudar a influência dos principais parâmetros de cada um dos filtros, foram gerados alguns sinais, sendo variados o espectro de frequência e o tempo total do sinal. Na Figura 3.1, é mostrado o sinal gerado utilizado para avaliação dos filtros através das simulações numéricas apresentadas neste item. Conforme mostrado nesta figura, o tempo usado para a simulação foi de 600 segundos e a excitação foi constante até 1 Hz, com uma variação linear entre 1 e 2 Hz e zero para frequências acima de 2 Hz.

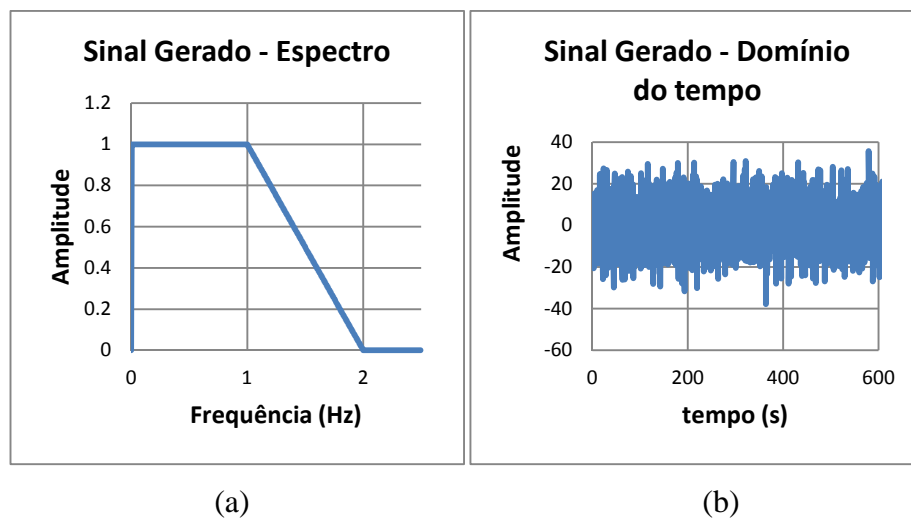


Figura 3.1 – Sinal gerado (a) no domínio da frequência e (b) no domínio do tempo

Conforme mostrado no item 2.2.a os principais parâmetros do filtro FIR são o número de coeficientes utilizados no filtro e a sua frequência de corte. A Figura 3.2 apresenta a função de transferência obtida, para uma frequência de corte de 0.1 Hz, em função da variação do número de coeficientes.

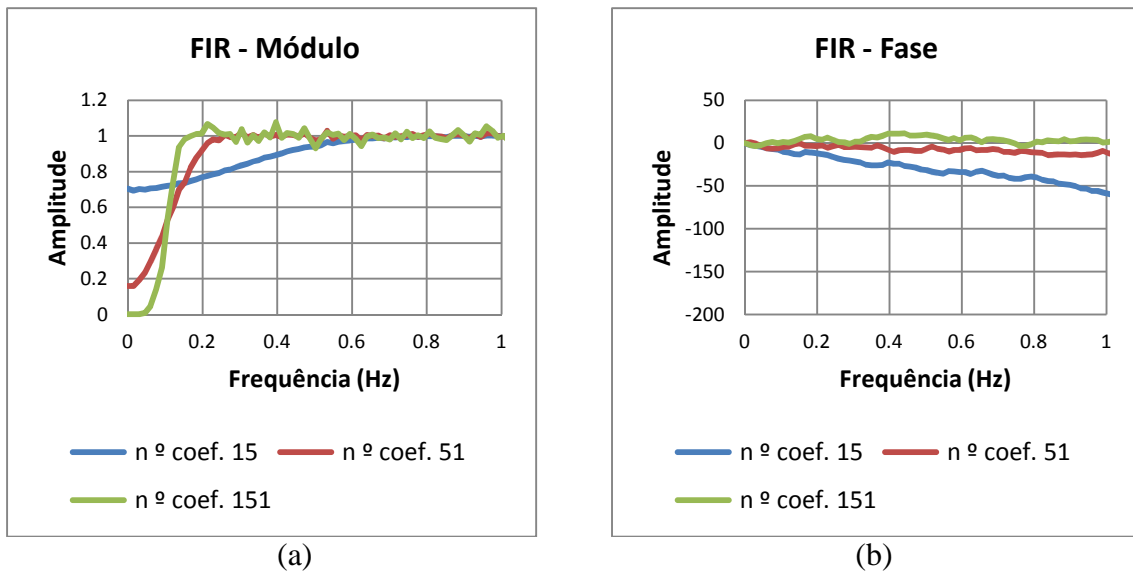


Figura 3.2 – (a) Módulo e (b) Fase do filtro FIR

Observa-se na Figura 3.2 que o acréscimo do número de coeficientes do filtro tende a melhorar tanto o módulo, quanto a fase da curva do filtro. Nota-se ainda, na Figura 3.2(a), que apenas quando se utiliza 151 coeficientes a amplitude da função de transferência obtida é a esperada, já que neste caso existe um trecho inicial no qual o filtro consegue anular as amplitudes, o que garante que as baixas freqüências foram eliminadas. Cabe ressaltar que quanto maior for o número de coeficientes maior será o tempo necessário para que o filtro se estabilize, fornecendo resultados adequados.

Conforme mostrado no item 2.2.b, os principais parâmetros do filtro IIR também são o número de coeficientes utilizados no filtro e a sua freqüência de corte. A Figura 3.3 apresenta o módulo e a fase obtidos para o filtro do tipo IIR, para uma freqüência de corte de 0.1 Hz, em função da variação do número de coeficientes.

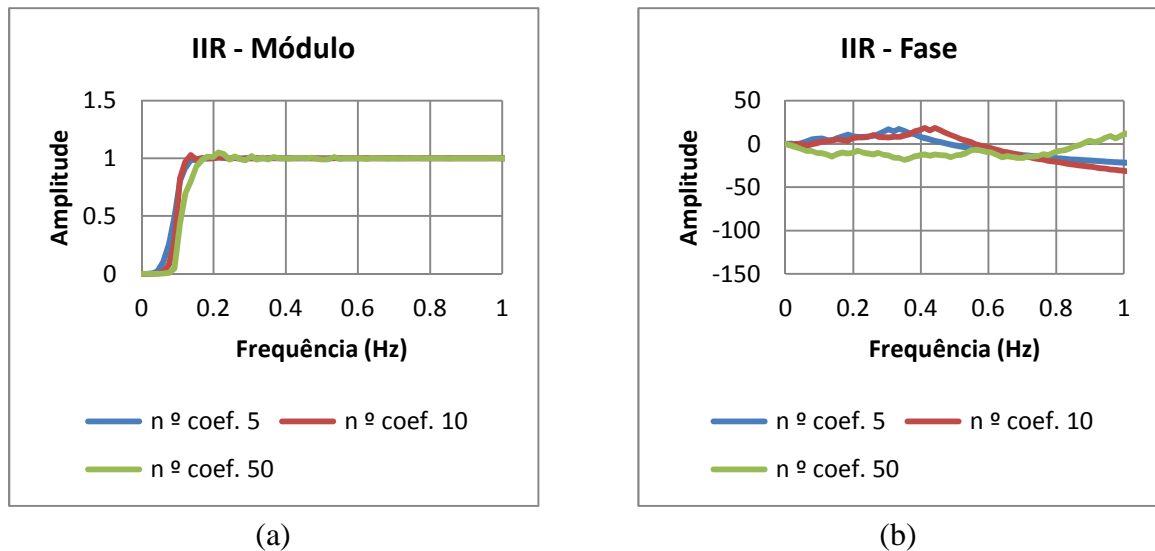


Figura 3.3 – (a) Módulo e (b) Fase do filtro IIR

A Figura 3.3(a) mostra que com cinco coeficientes o módulo da curva do filtro já é adequado, e que este número é consideravelmente menor, se comparado ao utilizado no filtro FIR, para obter uma resposta semelhante. Em relação a fase, observa-se na Figura 3.3(b) que esta não apresenta um comportamento linear e que o aumento do número de coeficientes do filtro não contribui para melhorar esta curva.

Os parâmetros que controlam o filtro do tipo *Spline* tensionada são o nível de tensão, p , aplicado à curva e o tamanho do sinal. O filtro baseado no ajuste de funções através da *Spline* tensionada, bem como o parâmetro p estão explicados no item 2.2.c desta dissertação. A Figura 3.4 apresenta a função de transferência obtida para o filtro do tipo *Spline* em função do nível de tensão, p , aplicado.

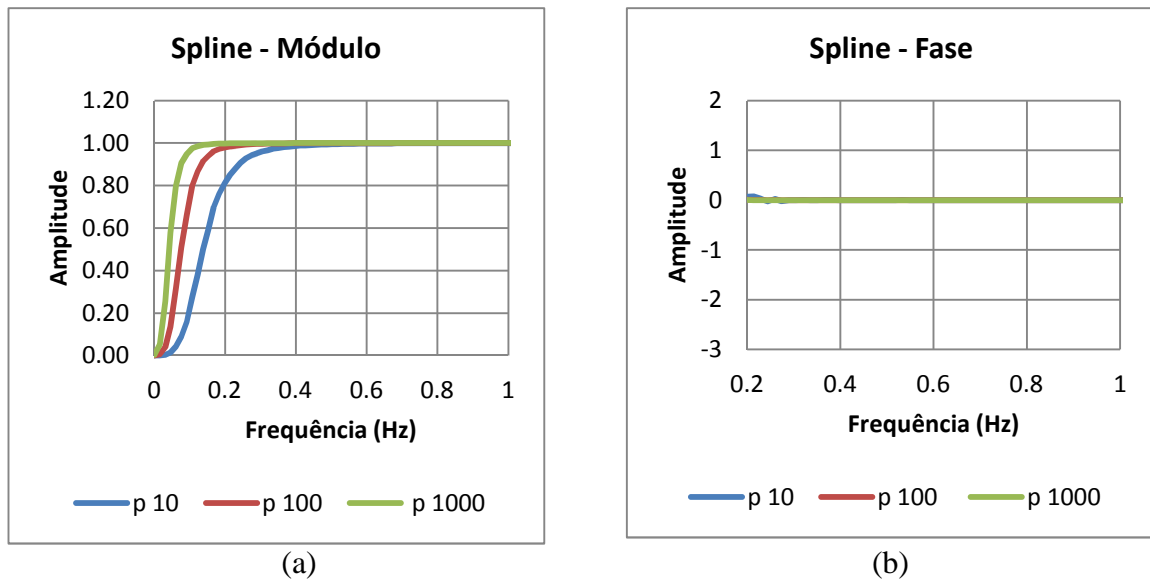


Figura 3.4 – (a) Módulo e (b) Fase do filtro Spline

A Figura 3.4 mostra que, para todos os valores de p , a curva de fase obtida é bastante próxima da esperada possuindo um trecho de amplitudes nulas e fase próximo a zero graus. Estas figuras também indicam que o acréscimo de p faz com que a frequência de corte seja reduzida. No entanto, uma desvantagem deste tipo de abordagem é que o coeficiente “ p ” não possui uma correlação clara com a frequência de corte.

Como neste tipo de filtro, a frequência de corte varia com p e com o tamanho do sinal, é necessário, para cada situação, um estudo paramétrico para avaliar a frequência de corte que está sendo imposta ao sinal. A Figura 3.5 apresenta a curva frequência de corte versus nível de tensão “ p ” obtida para os períodos de 600 e 1000 segundos.

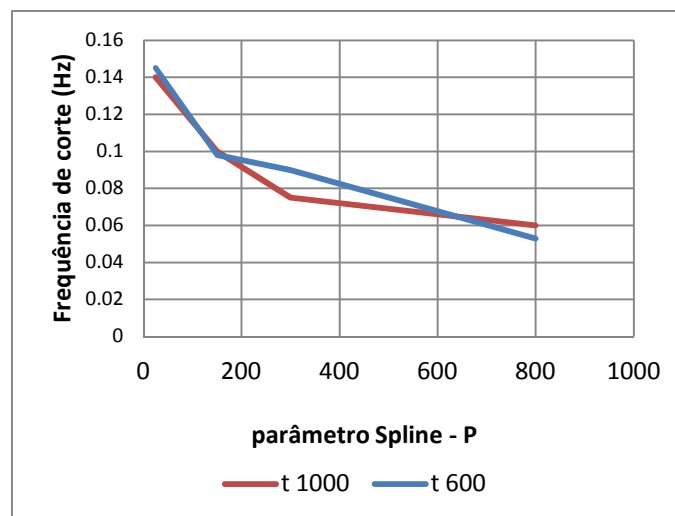


Figura 3.5 – Frequência de corte em função do nível de tensão aplicado a Spline

Analisando a Figura 3.5, observa-se que o tamanho do sinal gerado praticamente não influenciou a resposta do filtro. Nota-se ainda nesta figura que para se obter uma frequência de corte de 0.1 Hz, o valor da tensão imposta, p , deveria ser de aproximadamente 150.

De acordo com o apresentado no item 2.2.d, o principal parâmetro que controla o filtro do tipo Wavelet é o número de coeficientes que deve ser anulado das decomposições utilizadas para a análise inversa da transformada. A Figura 3.6 mostra a função de transferência obtida para três valores distintos.

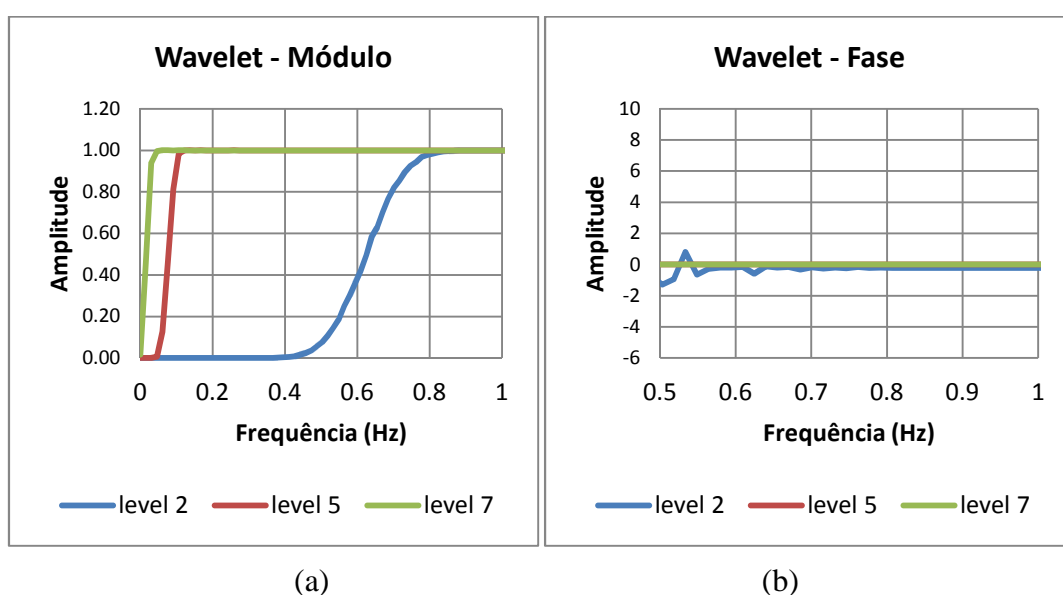


Figura 3.6 – (a) Módulo e (b) Fase do Filtro Wavelet

Conforme esperado, observa-se na Figura 3.6 que o acréscimo do número do coeficiente tende a reduzir a frequência de corte, no entanto, este valor possui um limite máximo a partir do qual o sinal não será mais filtrado. As três situações apresentadas mostram curvas de fase nulas semelhante às obtidas para o caso do filtro tipo *spline* tensionada. Para este filtro, a frequência de corte é dependente deste parâmetro e da frequência de aquisição do sinal, sendo necessário realizar um estudo paramétrico para estimar o valor mais adequado para a análise que se deseja realizar.

O parâmetro que controla a Transformada Rápida de Fourier é o número de coeficientes anulados. Este parâmetro depende principalmente do tamanho do sinal, já

que quanto maior for o sinal, menor será o incremento em frequência. Desta forma, para obter uma mesma frequência de corte seria necessário um maior número de coeficientes nulos. A Figura 3.7 apresenta a função de transferência obtida para um sinal gerado com 600 segundos, enquanto a Figura 3.8 mostra a amplitude obtida para 1200 segundos.

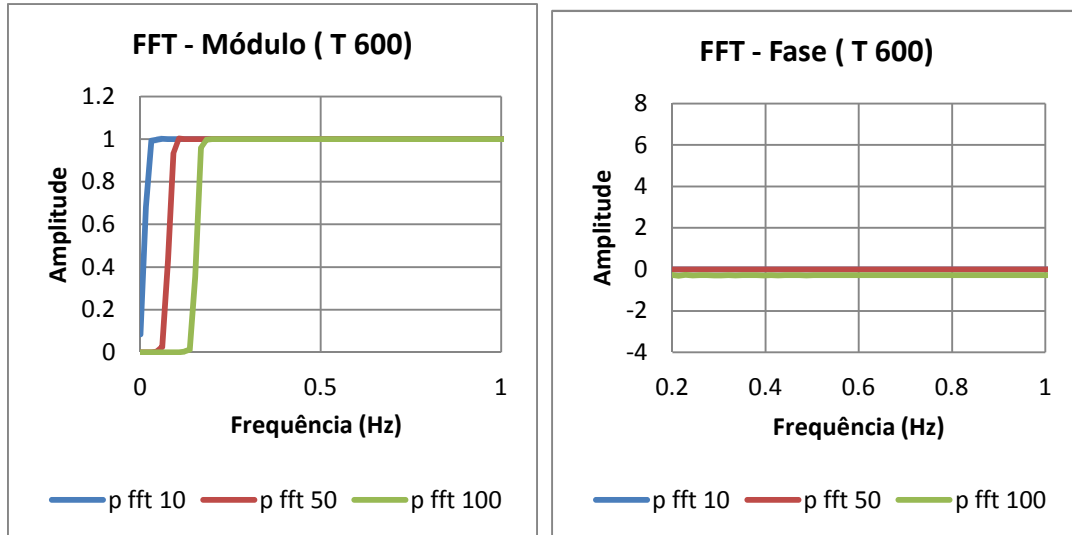


Figura 3.7 – (a) Módulo e (b) Fase do Filtro tipo FFT

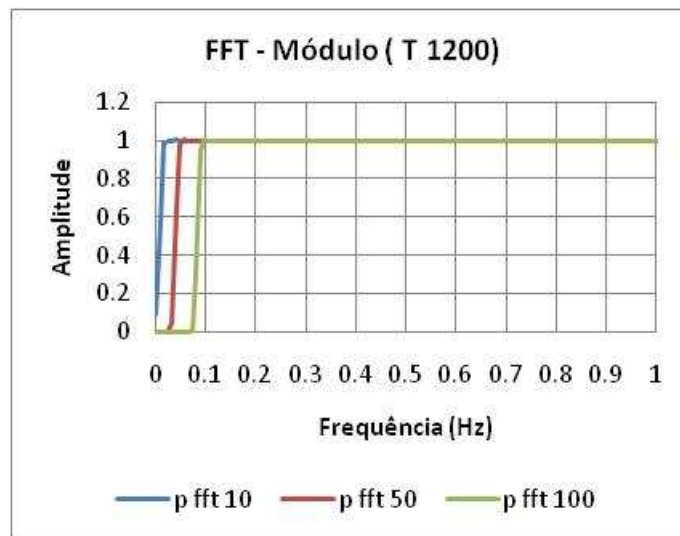


Figura 3.8 - Módulo do Filtro tipo FFT

Observa-se nas Figuras 3.7(a) e 3.8 que, conforme esperado, o acréscimo do número de coeficientes anulados aumenta a frequência de corte do filtro. Comparando-se estas figuras, nota-se ainda que com o aumento do tamanho do sinal, a frequência de corte diminui. Isto também já era esperado já que a resolução em frequência é o inverso do período do sinal.

Em relação à Figura 3.7(b), percebe-se que os três números de coeficientes anulados simulados apresentam curvas de fase próximas das esperadas, i. é, zero.

3. 2. Avaliação dos Filtros através de Testes Experimentais

Para verificar a eficiência dos filtros e dos métodos de integração, foi realizado um conjunto de ensaios utilizando-se uma mesa vibratória, do tipo eletro-magnética, instrumentada através de acelerômetros e de sensores de deslocamento. O propósito do experimento foi processar o sinal de aceleração e depois comparar o resultado obtido da dupla integração com os deslocamentos medidos.

Para medição direta dos deslocamentos, foram utilizados um sensor do tipo indutivo, com faixa de leitura de 3 a 15 mm, e um flexímetro elétrico, do tipo resistivo, com capacidade de 50 mm. Os dois servo-acelerômetros utilizados têm capacidade de 1g ($9,81 \text{ m/s}^2$) e foram instalados nas direções vertical e horizontal. As medidas do acelerômetro vertical tinham como objetivo avaliar se a mesa vibratória tinha algum movimento vertical que pudesse interferir nas análises dos ensaios. As medidas do acelerômetro horizontal foram usadas para efeito de comparação com os sensores de deslocamento. Deve-se ressaltar que os movimentos verticais medidos foram praticamente nulos e que estes não interferiram nas análises realizadas.

Foram gerados sinais harmônicos e randômicos através de um analisador de espectros, os quais eram enviados para a mesa vibratória. A Figura 3.8 mostra uma vista geral do aparato utilizado,

A primeira etapa dos testes teve como objetivo avaliar a resposta dos dois tipos de sensores de deslocamento, do acelerômetro e do excitador em função da frequência de excitação. Na Tabela 3.1 são apresentadas as frequências impostas nessa primeira etapa de testes, bem como os tipos de sensores de deslocamento utilizados. A frequência de aquisição utilizada foi pelo menos 20 vezes o valor da frequência de excitação.

Tabela 3.1-Freqüências Impostas

Ensaio Hârmonico		Ensaio Randômico	
Sensor indutivo e Flexímetro Elétrico	Somente Flexímetro Elétrico	Sensor indutivo e Flexímetro Elétrico	Somente Flexímetro Elétrico
Freqüência (Hz)	Freqüência (Hz)	Freqüência (Hz)	Freqüência (Hz)
1 a 10	0.1	0-1.5	0-1.5
15	0.5	0-3	0-3
20	1	0-6	0-6
30		0-25	0.25-1-1.75
50		0-50	
75		0-100	
100			

Primeiramente foram realizados ensaios usando o acelerômetro, o sensor indutivo e o flexímetro elétrico. Porém constatou-se que o deslocamento encontrado para essa faixa de freqüência era muito pequeno, assim com o objetivo de aumentar a amplitude de deslocamento optou-se por somente usar o flexímetro elétrico.

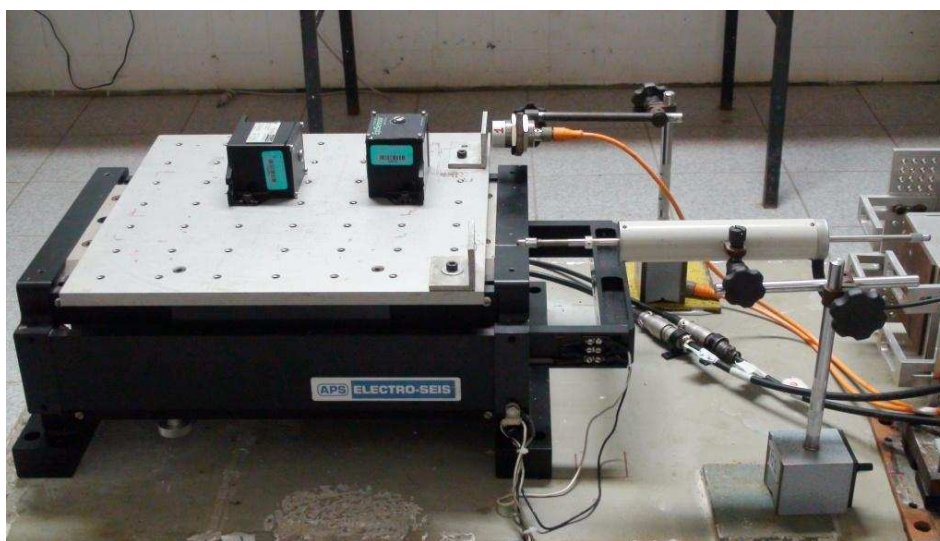


Figura 3.8 - Vista Geral dos Testes Realizados

No ensaio harmônico com o uso dos dois sensores de deslocamento, estes tiveram respostas praticamente idênticas na faixa de 1 a 5 Hz, Na Figura 3.9 é apresentada a correlação obtida desses sensores para a freqüência de 2Hz. Após essa faixa de freqüência, o flexímetro começou a apresentar certo nível de ruído, tendo uma resposta aceitável até uma freqüência de 15Hz . A partir de 75 Hz, o sensor indutivo começou a apresentar ruído no seu sinal como pode ser visto na Figura 3.10, a qual apresenta uma comparação entre o deslocamento medido pelo sensor indutivo e o sinal

integrado e filtrado da aceleração através da *Spline*. Esses mesmos limites foram observados nos testes randômicos.

Baseados nos resultados dos testes iniciais foram utilizados nos ensaios com frequências de excitação menores que 6 Hz, somente o flexímetro. Este fato foi devido à necessidade de se impor maiores deslocamentos nas frequências mais baixas, já que os acelerômetros não estavam respondendo adequadamente, nessas frequências, quando submetidos a deslocamentos pequenos.

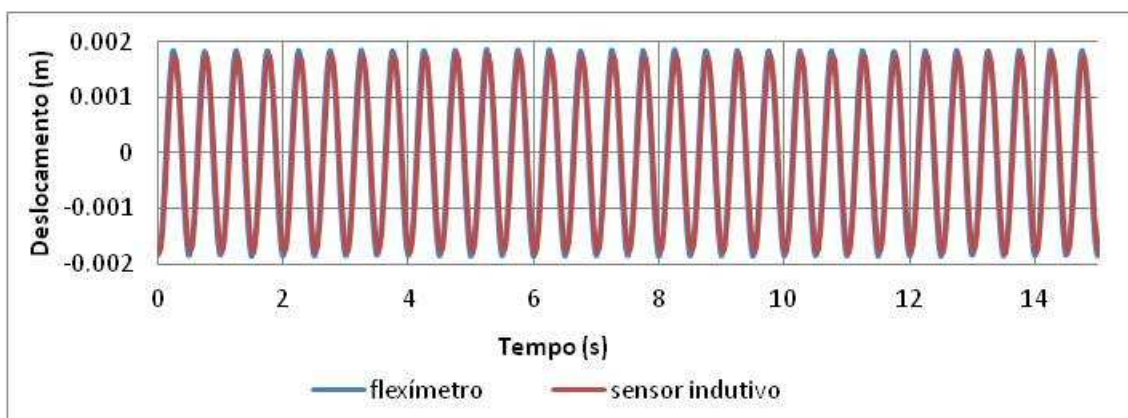


Figura 3.9 - Resposta dos sensores de Deslocamento (m) para a frequência de 2Hz

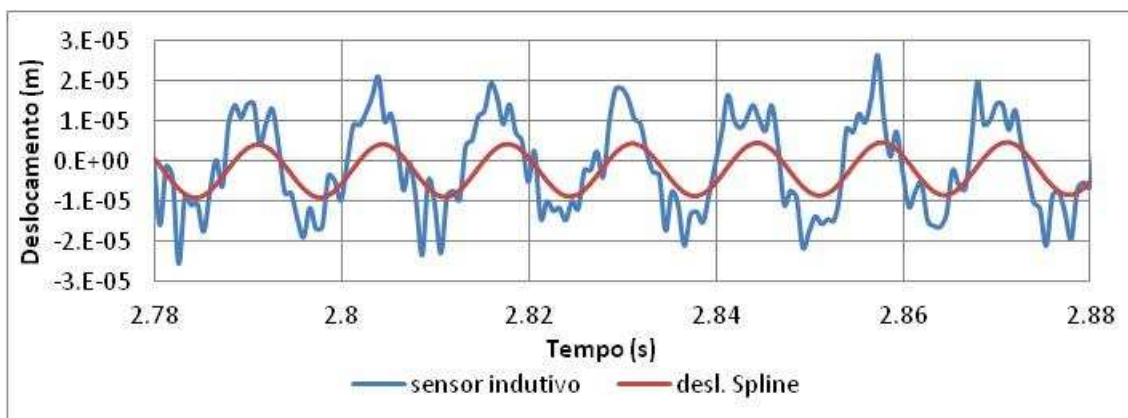


Figura 3.10 - Resposta dos sensores de Deslocamento (m) para a frequência de 75Hz.

O esquema da Figura 3.11 mostra a metodologia utilizada para comparar os sinais dos deslocamentos obtidos a partir da dupla integração do sinal do acelerômetro com o lido diretamente pelo sensor de deslocamento.

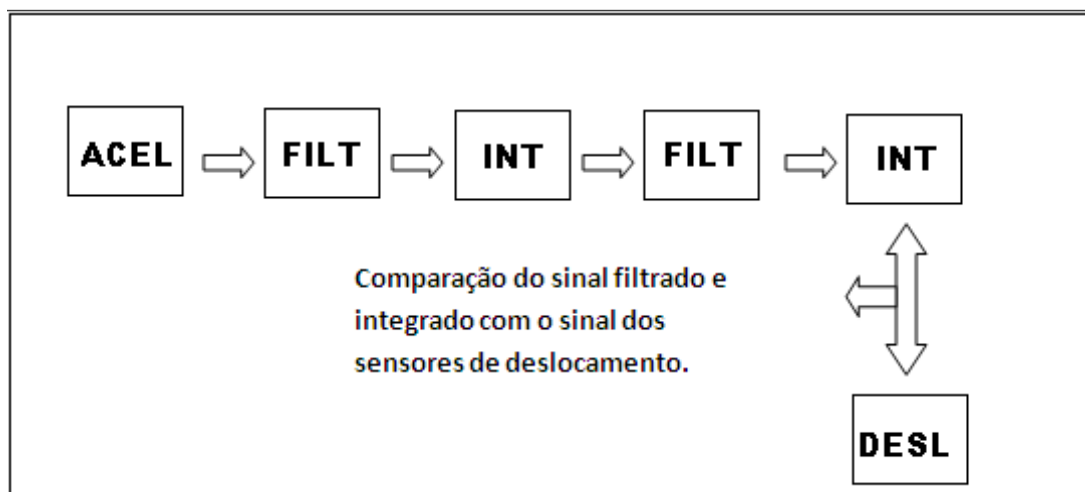


Figura 3.11 – Metodologia utilizada

Na Figura 3.12, tem-se como exemplo um sinal harmônico, com frequência de 10 Hz, que foi integrado duas vezes e filtrado com a *Spline*, conforme esquema indicado na Figura 3.11. Percebe-se a boa correlação entre o sinal do sensor indutivo e o sinal integrado duas vezes do acelerômetro. Ainda nessa figura, pode-se notar o ruído presente no flexímetro, o qual já tinha sido observado anteriormente, para frequências acima de 5 Hz.

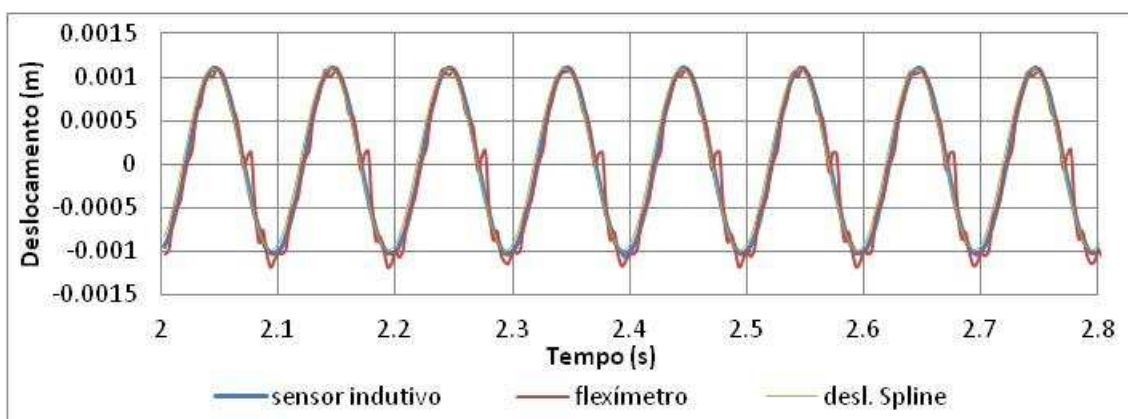


Figura 3.12 – Deslocamentos (m) obtidos para a frequência de 10 Hz

A Figura 3.13 apresenta a comparação entre os deslocamentos obtidos pelo sensor indutivo e pelo acelerômetro utilizando-se o filtro *Spline* para a frequência de excitação de 0.5 Hz. Pode-se observar nesta figura, a excelente correlação obtida quando se utiliza a dupla integração com filtro *Spline* para baixas frequências. Apesar da boa correlação obtida, a amplitude do sinal imposta era muito pequena, dificultando a integração do sinal.

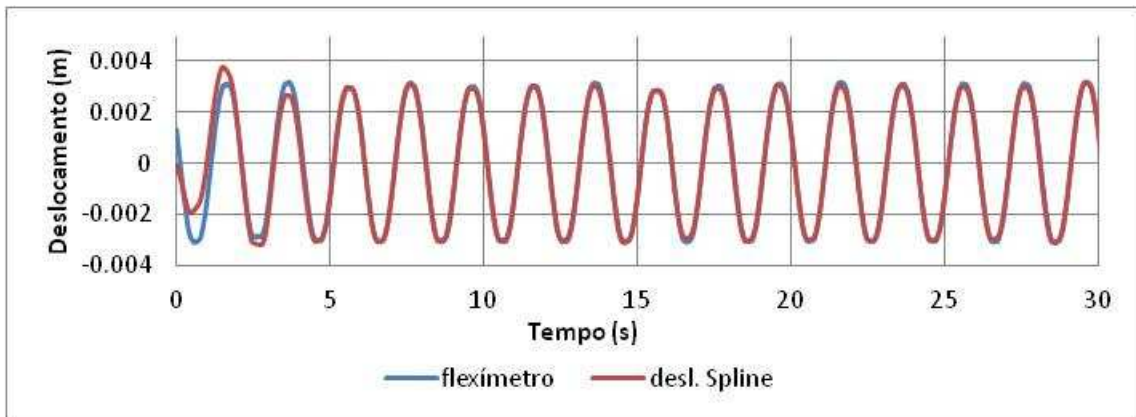


Figura 3.13- Deslocamentos (m) obtidos para a frequência de 0.5 Hz

Para contornar esse problema, foi realizada uma segunda etapa de ensaios onde a amplitude de deslocamento imposta foi maior a fim de que o acelerômetro apresentasse uma amplitude de resposta mensurável. Foram impostos sinais harmônicos e randômicos de baixas frequências de acordo com a Tabela 3.2. O valor da amplitude pico a pico ficou em torno de 80 mm para os sinais harmônicos e a frequência de aquisição foi de 100 Hz. Os parâmetros utilizados para todos os filtros em todas as análises foram os mesmos do sinal harmônico de 0.1 Hz, já que esta era a menor frequência. O tempo de aquisição do sinal foi de aproximadamente 10 minutos para todas as frequências de excitação impostas.

Tabela 3.2 - Frequências impostas

Harmônico	Randômico
Freq (Hz)	Freq (Hz)
0.1	0-0.5
0.2	0-1
0.4	0-2
0.6	0-1.5
1.0	
2.0	

A comparação dos deslocamentos medidos e dos obtidos através da dupla integração do sinal de aceleração com os cinco tipos de filtros utilizados, para todas as frequências analisadas, são apresentadas no Anexo 1. Nessas Figuras, bem como nas demais apresentadas a seguir, os deslocamentos estão expressos em metros e o tempo em segundos.

3. 2.1 - Análise com Sinais Harmônicos.

a) Frequência de 0.1 Hz

As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam uma comparação entre deslocamentos obtidos com o flexímetro e através da dupla integração do acelerômetro utilizando-se os filtros FIR e IIR, respectivamente, para a frequência de excitação de 0.1 Hz.

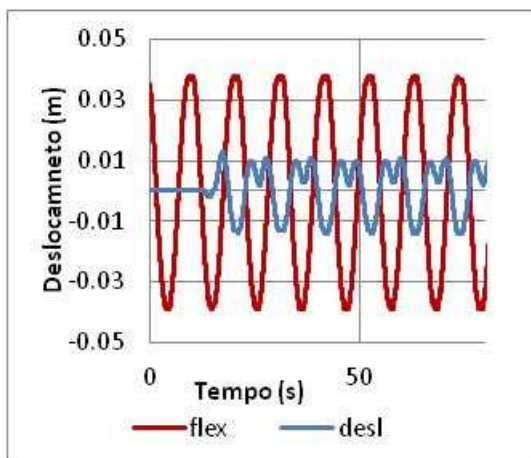


Figura 3.14 – Desloc. Obtido através do FIR

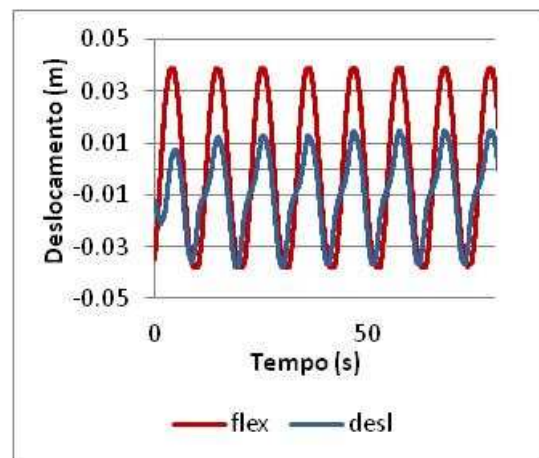


Figura 3.15 – Desloc. Obtido através do IIR

Pode-se observar nessas figuras que os dois tipos de filtros apresentaram uma grande distorção na amplitude do sinal, e o deslocamento obtido através do filtro FIR também apresentou uma grande defasagem em relação ao sinal de referência.

O deslocamento obtido utilizando-se o filtro *Wavelet* foi menor do que o medido pelo flexímetro, conforme mostrado na Figura 3.16.

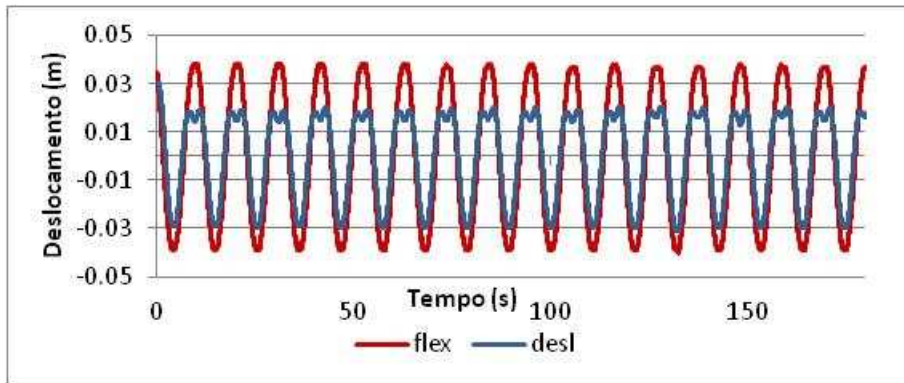


Figura 3.16 – Deslocamento obtido através do filtro *Wavelet*

A melhor correlação obtida entre o sinal do acelerômetro integrado e filtrado e o medido pelo sensor de deslocamento foi com a utilização dos filtros *Spline* e FFT, conforme apresentado nas Figuras 3.17 e 3.18, respectivamente. Deve-se ressaltar que a integração de sinais com baixas frequências são mais difíceis de serem realizadas, mas apesar disto a integração com os filtros dos tipos *Spline* e FFT apresentaram resultados bem consistentes.

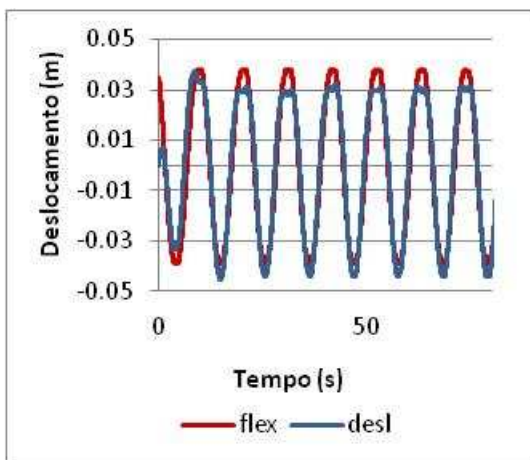


Figura 3.17 - Deslocamento obtido através do filtro *Spline*

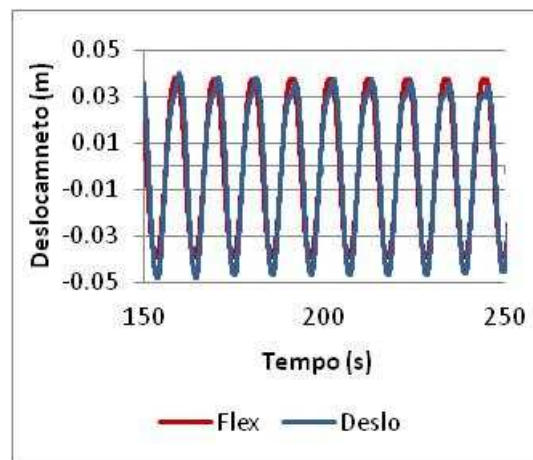


Figura 3.18 - Deslocamento obtido através do filtro FFT

b) Frequência de 0.2 Hz

Para a frequência de 0.2 Hz, o sinal de deslocamento obtido a partir da integração apresentou uma perda do início do sinal no filtro FIR, e no início do filtro IIR houve um tempo de ajuste do filtro. No entanto, todos os cinco filtros utilizados

tiveram resposta satisfatória conforme mostrado no Anexo 1. As Figuras 3.19 e 3.20 apresentam as respostas obtidas utilizando-se os filtros FIR e *Wavelet*, respectivamente.

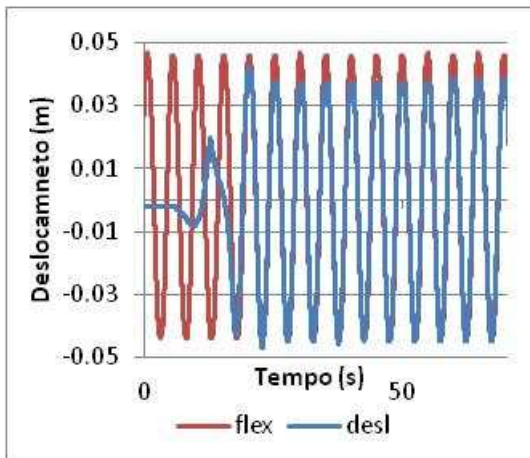


Figura 3.19 - Deslocamento obtido através do filtro FIR

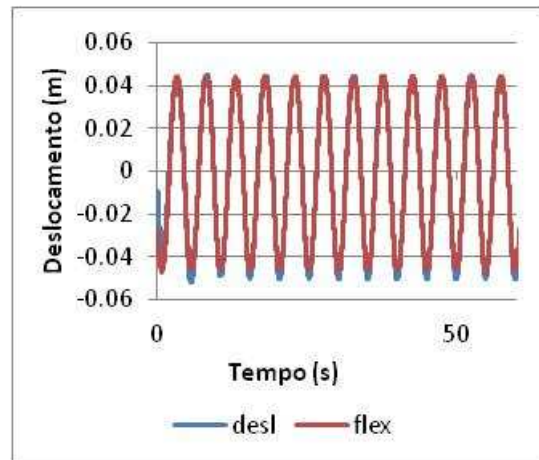


Figura 3.20 - Deslocamento obtido através do filtro Wavelet

c) Frequência de 0.4 Hz

No sinal de deslocamento obtido utilizando-se o filtro IIR, observou-se, além de uma defasagem do sinal, o aparecimento de um nível DC inexistente no sinal original (vide Anexo 1). No uso do filtro FIR, houve tanto uma perda do início do sinal, quanto a ocorrência de um nível DC, porém conservou-se o mesmo valor de amplitude em módulo, conforme se pode observar na Figura 3.21. Na filtragem do sinal com os filtros FFT e *Spline* houve um pequeno tempo de ajuste no início, porém depois foi obtida uma excelente correlação, conforme mostrado na Figura 3.22 para o filtro do tipo FFT. O filtro que teve uma excelente correlação em todas as etapas de filtragem foi o filtro *Wavelet*. A Figura 3.23 mostra a correlação obtida entre o sinal do flexímetro e da dupla integração do acelerômetro utilizando o filtro do tipo *Wavelet*.

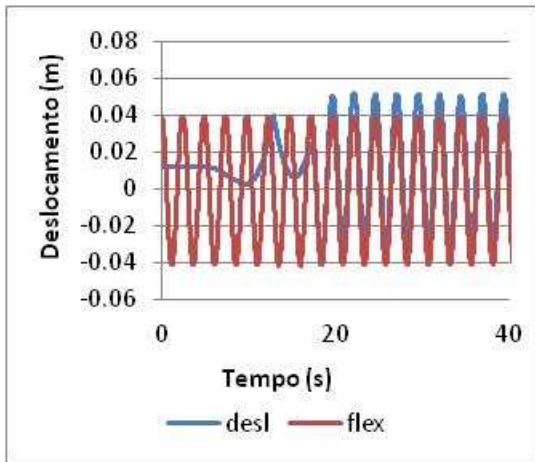


Figura 2.21 - sinal deslocamento do filtro FIR

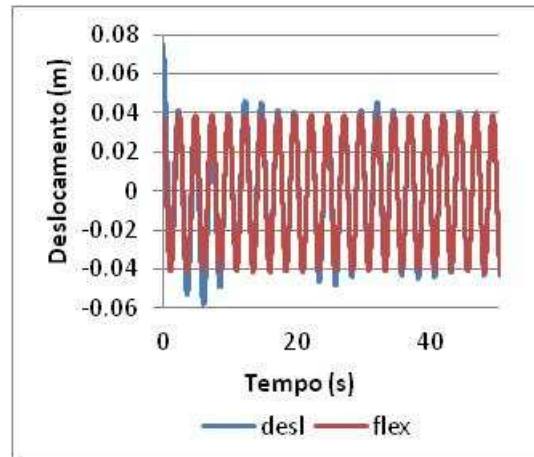


Figura 3.22 - sinal deslocamento do filtro FFT

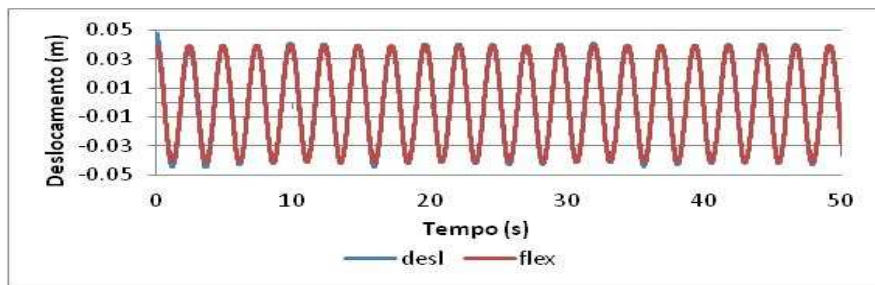


Figura 3.23 - sinal deslocamento filtro *Wavelet*

d) Frequência de 0.6 Hz

O sinal de deslocamento obtido com o filtro FIR também apresenta uma perda do seu início, conforme indicado na Figura 3.24. Os sinais de deslocamento obtidos utilizando os filtros IIR, *Spline*, *Wavelet* e FFT necessitaram de um tempo de ajuste no início do sinal, conforme mostrado na Figura 3.25 para o filtro *Wavelet*. Os filtros *Spline* e *Wavelet* foram os que realizaram esse ajuste de forma mais rápida. Após esse ajuste, todas as respostas dos filtros foram satisfatórias. Vale lembrar que esse período de ajuste é correlacionado com o tamanho total do sinal, pois quanto maior o sinal, o ajuste é realizado de forma mais rápida.

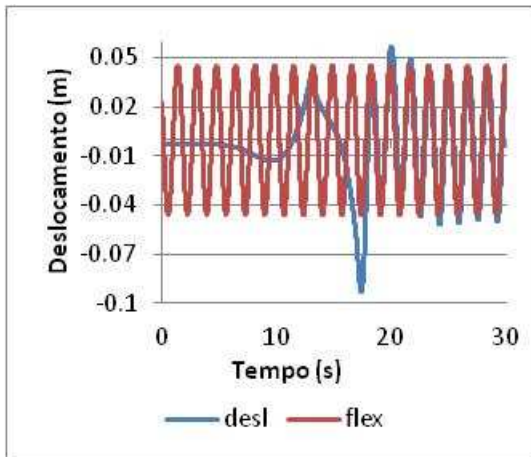


Figura 3.24 - sinal deslocamento FIR

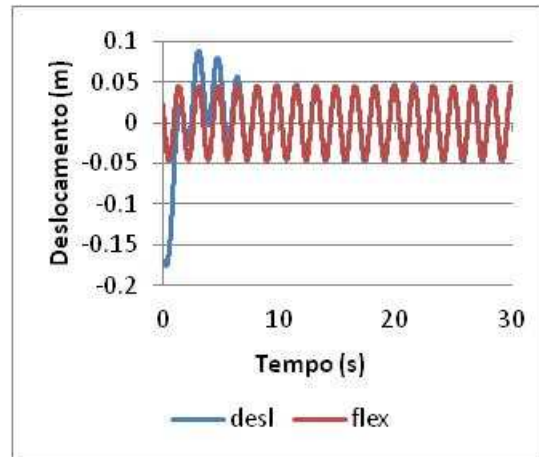


Figura 3.25-sinal deslocamento Wavelet

e) Frequência de 1.0 Hz

Os sinais de deslocamento obtidos através dos filtros FIR e IIR se mostraram muito semelhantes aos obtidos para a frequência de 0.6 Hz. Já os referentes aos filtros *Spline*, *Wavelet* e FFT apresentaram uma ótima correlação em todas as etapas de filtragem, conforme mostrado nas Figuras 3.26 e 3.27 para os filtros FFT e *Wavelet*.

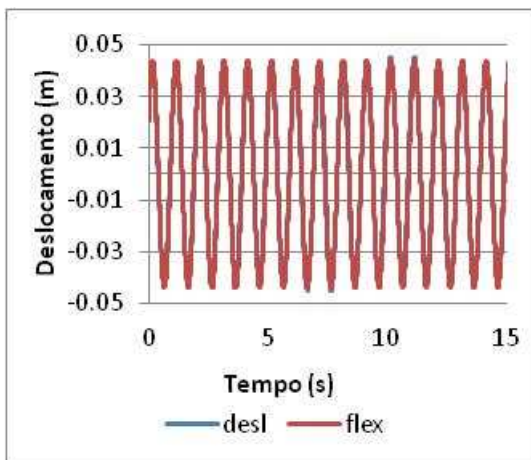


Figura 3.26 -sinal deslocamento FFT

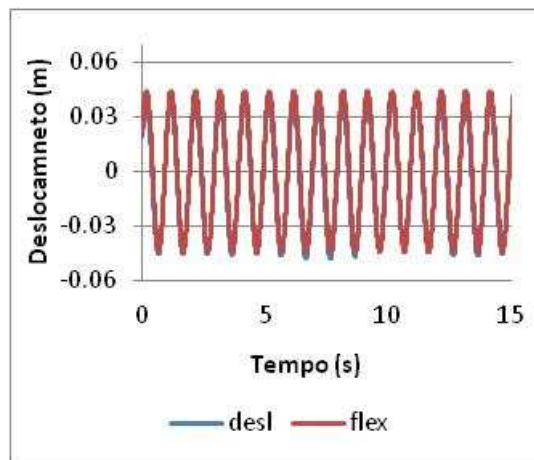


Figura 3.27-sinal deslocamento *Wavelet*

f) Frequência de 2.0 Hz

O filtro FIR apresentou as mesmas características observadas para as demais frequências, i. é, se perde no início e leva um tempo para se ajustar. O sinal de deslocamento obtido através do filtro IIR não se correlacionou bem com o do flexímetro. No início, o sinal processado teve grandes oscilações, as quais foram

diminuindo ao longo do tempo, porém ainda assim não se obteve um sinal razoável para efeito de comparação.

O filtro *Wavelet* foi o que apresentou melhor correlação entre o sinal de deslocamento processado e o flexímetro. O filtro *Spline* necessitou de um tempo de ajuste no início, porém seu sinal foi satisfatório quando comparado com a medida do flexímetro, assim como o processado utilizando-se o filtro FFT. As Figuras 3.28 e 3.29 apresentam, respectivamente, as correlações obtidas para os filtros *Wavelet* e FFT, sendo as demais apresentadas no Anexo 1.

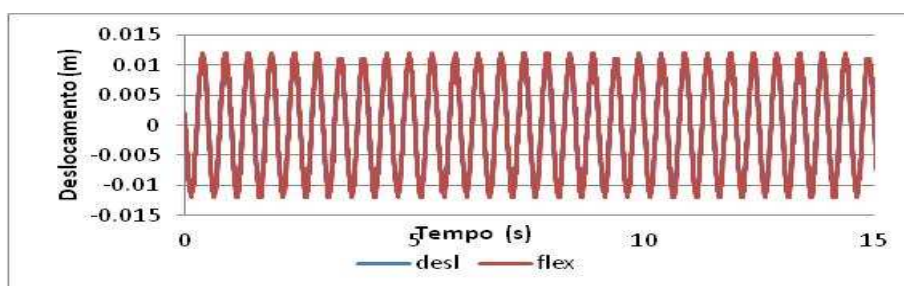


Figura 3.28 - sinal deslocamento *Wavelet*

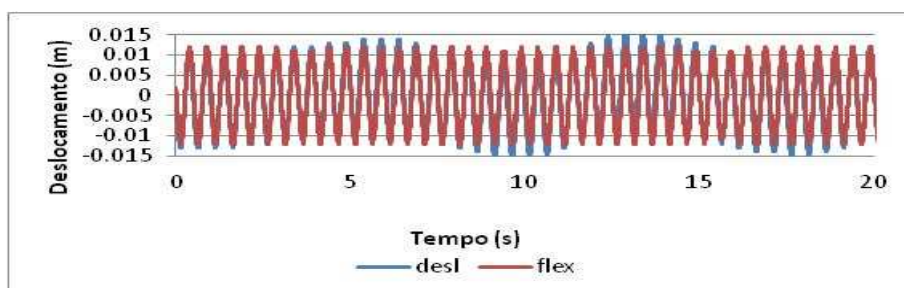


Figura 3.29 - sinal deslocamento FFT

Resumindo os resultados obtidos para os sinais harmônicos conclui-se que, de uma forma geral, os filtros não convencionais dos tipos *Spline*, FFT e *Wavelet* apresentaram resultados excelentes; a única exceção é referente ao filtro do tipo *Wavelet* para a frequência imposta de 0.1 Hz.

Por outro lado, os filtros convencionais dos tipos FIR e IIR não responderam satisfatoriamente para a frequência de 0.1 Hz. Para as demais frequências, esses filtros perdem o início do sinal, levando um tempo para se ajustar.

3. 2.2 - Análise dos Sinais Randômicos.

Conforme indicado na Tabela 3.2, foram impostos sinais randômicos do tipo ruído branco para as faixas de frequência 0 a 0.5 Hz, 0 a 1. 0, 0 a 1.5 e 0 a 2 Hz. Como as três últimas faixas de frequência apresentaram resultados muito semelhantes serão mostrados, ao longo do texto, apenas os resultados referentes à faixa de 0 a 1.5 Hz, sendo os demais apresentados no Anexo 1.

a) Frequência 0-0.5 Hz

No caso de sinais provenientes de estruturas *offshore* esta é a faixa mais importante de análise entre os testes realizados. Os filtros que tiveram melhor resposta após as duas integrações e filtragens do sinal do acelerômetro foram o *Spline*, *Wavelet* e FFT. No filtro FIR houve uma perda de sinal no início e não houve um ajuste satisfatório tanto no FIR, quanto no IIR.

As Figuras 3.30 a 3.32 apresentam as correlações obtidas para os filtros dos tipos *Wavelet*, *Spline* e FFT, respectivamente.

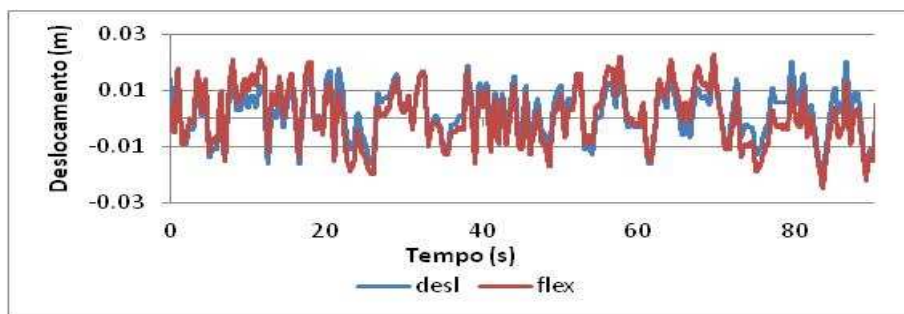


Figura 3.30 - sinal randômico deslocamento *Wavelet*

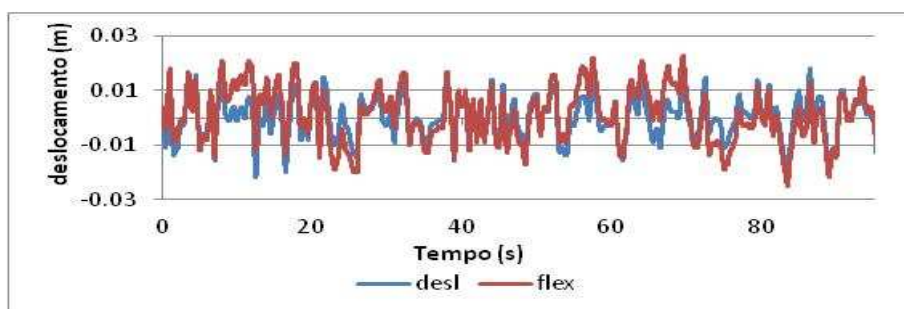


Figura 3.31 - sinal randômico deslocamento *Spline*

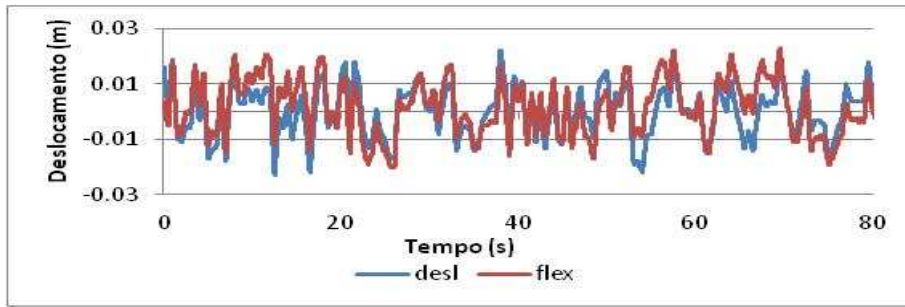


Figura 3.32 - sinal randômico deslocamento FFT

b) Frequência 0-1.5 Hz

O comportamento para esta faixa de frequências foi o mesmo observado para o sinal randômico de 0-0.5 Hz. Os filtros que tiveram melhor correlação entre o sinal gerado pelo flexímetro e o deslocamento processado foram os filtros *Spline*, *Wavelet* e *FFT*, sendo a correlação entre os dois últimos mostradas nas Figuras 3.33 e 3.34. Como nas demais faixas de frequência, os filtros *FIR* e *IIR* não apresentaram resultados satisfatórios conforme visto na Figura 3.35.

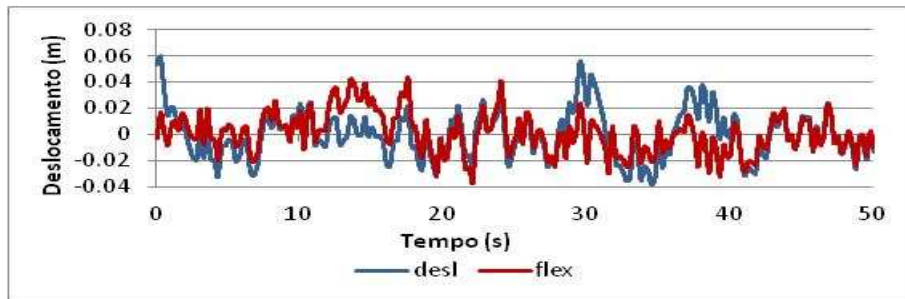


Figura 3.33-sinal randômico deslocamento *Wavelet*

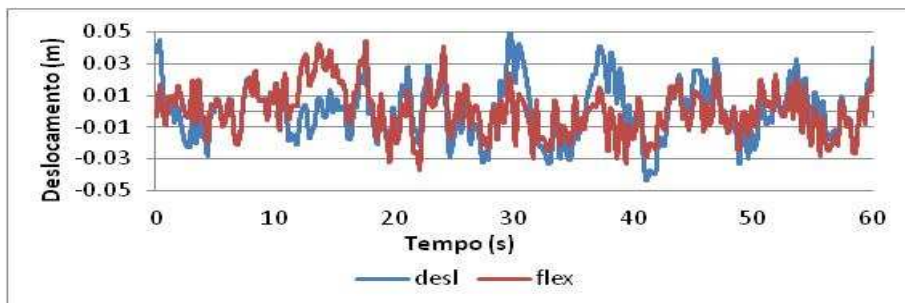


Figura 3.34-sinal randômico deslocamento FFT

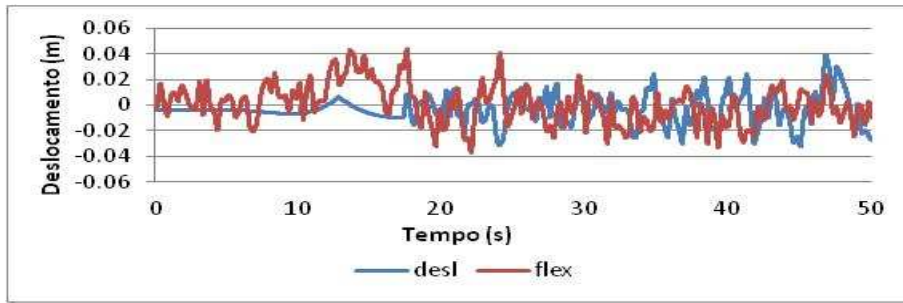


Figura 3.35-sinal randômico deslocamento FIR

4. AVALIAÇÃO DOS FILTROS ATRAVÉS DA ANÁLISE DAS RESPOSTAS DE UM PÊNDULO

Conforme mencionado no capítulo I deste trabalho, o principal objetivo desta pesquisa é desenvolver, implementar e avaliar metodologias para a estimativa de deslocamentos e rotações em estruturas do tipo *offshore* tais como: risers, dutos, etc.. a partir de sinais de aceleração e de velocidades angulares coletados a partir de unidades de medição inercial (garrafas).

Essas unidades de medição inerciais têm sido instaladas em estacas torpedo [3] e *risers* [1]. A principal motivação deste trabalho foi a necessidade de se medir o deslocamento relativo entre um *riser* e seu *Bend Stiffner* instalados na plataforma P33, já que este vinha apresentando um desgaste excessivo devido ao atrito entre a capa do *riser* e o *bend stiffner*. A idéia era medir o deslocamento relativo utilizando-se duas unidades de medição, sendo uma instalada no *riser* e outra no *Bend Stiffner*.

Para avaliar a metodologia desenvolvida em uma situação mais próxima da real foi realizada uma série de ensaios em um pêndulo com capacidade de gerar movimentos rotacionais e axiais. Este sistema foi fixado a um dos pórticos metálicos existentes no Laboratório de Estruturas. Neste ensaio, uma das garrafas foi fixada à estrutura do pêndulo, enquanto a outra foi presa a um aparato que permite o movimento axial em relação ao pêndulo. Estes ensaios serviram para aferir tanto as garrafas, quanto a metodologia utilizada para o processamento dos dados. Para isto, os resultados do processamento foram correlacionados com as medições realizadas com outros sensores, os quais realizaram medições diretas das grandezas processadas. Cabe ressaltar que apesar de bem sucedido, não foi possível aprofundar o processamento dos sinais coletados do experimento no campo durante o projeto, sendo este estudo realizado neste trabalho.

4. 1. Descrição do Aparato de Ensaio e da Instrumentação

O aparato de testes consiste de um pêndulo que pode ser movido lentamente ou deixado em vibração livre. Devido às limitações dos sensores, a amplitude máxima de rotação foi restringida em 10 graus.

A Figura 4.1 apresenta uma vista geral da montagem onde se observa que a estrutura do pêndulo foi projetada para ser suficientemente rígida, de maneira a não apresentar vibrações, e desta forma não afetar as medições realizadas. Nesta Figura também se pode observar os sensores utilizados para a aferição das medidas, bem como as duas garrafas de medição de vibrações.

As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram os sistemas de fixação das duas garrafas. A garrafa superior foi fixada a um sistema que permite um deslocamento axial relativo ao pêndulo, enquanto a garrafa inferior é fixada diretamente sobre a estrutura do pêndulo. O movimento da garrafa superior foi gerado através de um cabo preso na sua estrutura de suporte da garrafa, passando por uma roldana fixada abaixo da rótula e preso a um ponto fixo no pórtico, sendo a amplitude de movimento da garrafa controlada através da distância entre a rótula do pêndulo e a roldana. Detalhes deste sistema podem ser observados nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

A garrafa de medição de vibrações é constituída por três acelerômetros e dois sensores de medição de velocidades angulares. Estes sensores são fixados perpendicularmente entre si, sendo um par de sensores instalado na direção do eixo longitudinal da garrafa. Em todos os ensaios foram registradas as medições destes cinco sensores, sendo estes processados posteriormente a fim de obter os deslocamentos e as rotações.



Figura 4.1 – Vista Geral da Montagem [1]

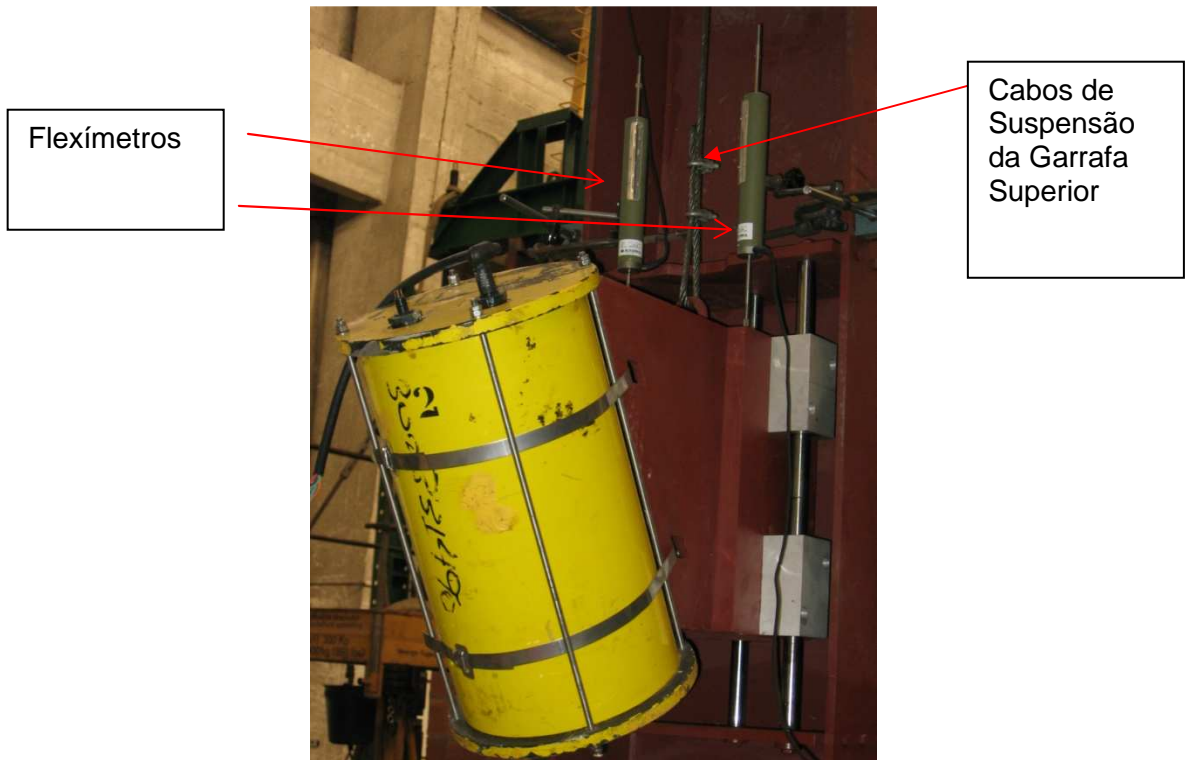


Figura 4.2 – Sistema de Fixação da Garrafa Superior [1]



Figura 4.3 – Sistema de Fixação da Garrafa Inferior [1]

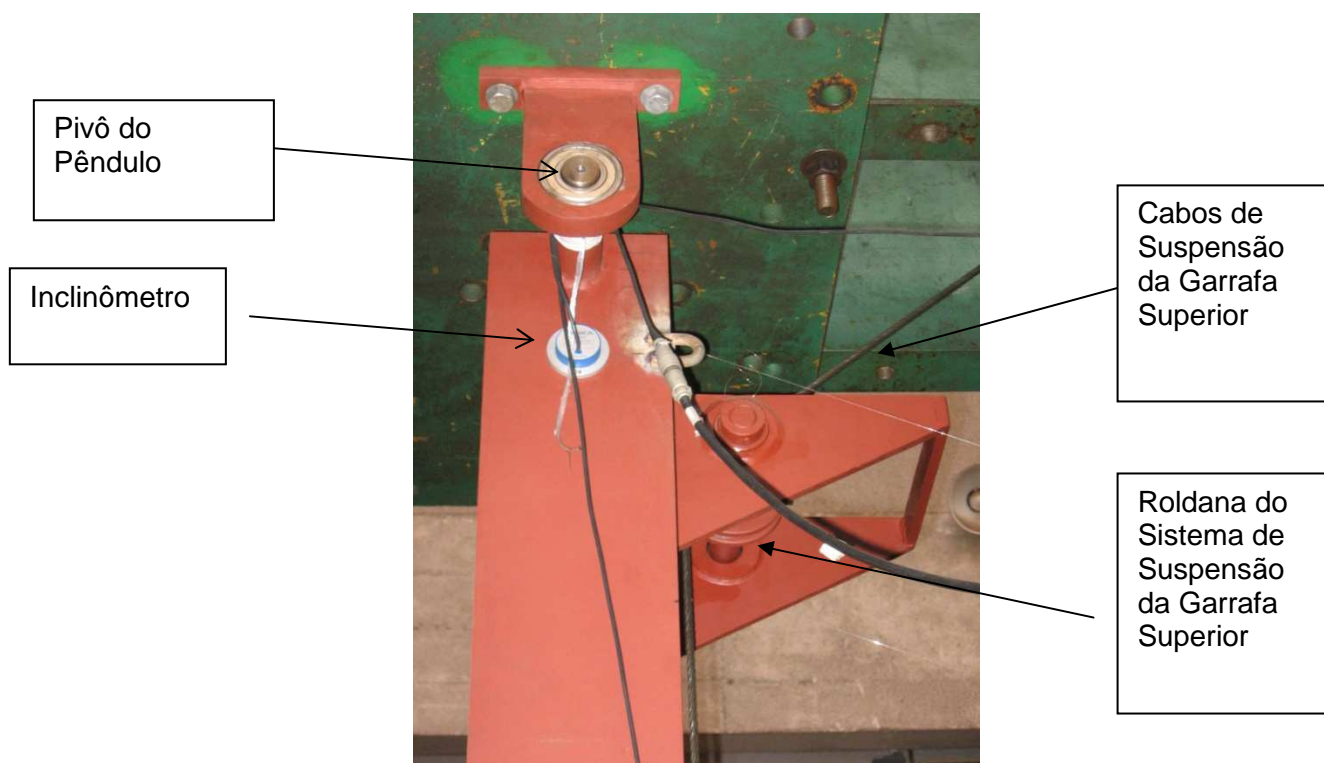


Figura 4.4 – Vista Superior da Montagem [1]

A fim de aferir as medições realizadas pelas garrafas, foram instalados dois flexímetros para medir os deslocamentos axiais da garrafa móvel e um inclinômetro para medir as rotações do pêndulo, conforme ilustrado nas Figuras 4.2 e 4.4. Os flexímetros elétricos têm capacidade de 50 mm, enquanto o inclinômetro pode medir até 80 graus em relação a vertical.

A Figura 4.5 apresenta as principais dimensões do sistema bem como a posição da instrumentação utilizada. Deve-se observar nesta figura, que as garrafas de medição de vibrações foram fixadas com um ângulo inicial de aproximadamente 30 graus. Isto se deve ao fato de que a metodologia para estimar as direções de medição no plano perpendicular à direção longitudinal das garrafas, é realizada através da média das componentes de aceleração da gravidade medidas pelos três acelerômetros. Desta forma, se as garrafas fossem instaladas na vertical, as médias das medidas realizadas por dois destes acelerômetros seriam praticamente nulas, impossibilitando assim definir a posição correta de instalação da garrafa.

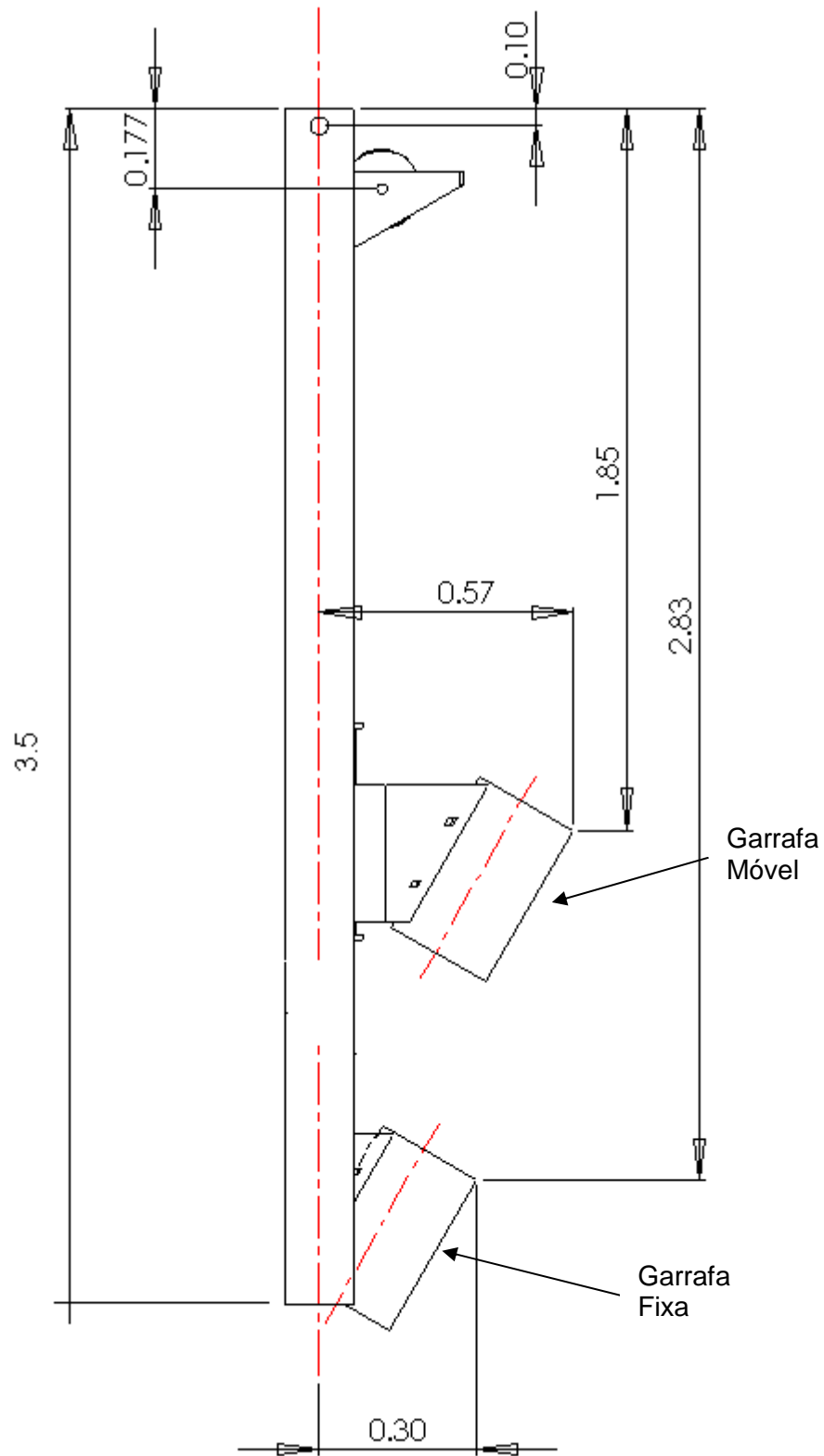


Figura 4.5 - Vista Geral do Sistema de Calibração (dimensões em metros)

Conforme será mostrado no próximo item, os dois parâmetros de referência para avaliar a metodologia desenvolvida nos testes dinâmicos são o ângulo de rotação do pêndulo e o deslocamento relativo entre as garrafas. Conforme mostrado na Figura 4.2, o deslocamento relativo foi monitorado com flexímetros elétricos e o ângulo com um inclinômetro elétrico como indica a Figura 4.4. Com o objetivo de se estimar a precisão do inclinômetro, este foi aferido contra um inclinômetro mecânico de bolha com capacidade de medir até 5 graus e precisão de 1 segundo de grau. Para isto, foram impostas rotações ao pêndulo e este foi mantido nestes ângulos de maneira que fosse possível realizar medições estáticas com os inclinômetros elétrico e mecânico. A Tabela 4.1 apresenta a correlação entre os ângulos medidos com os dois sensores, sendo adotada a posição zero grau como referência. Conforme se pode observar nesta tabela, os valores obtidos apresentaram uma boa correlação, demonstrando a precisão do inclinômetro elétrico.

Tabela 4.1 – Ângulos (graus) do Pêndulo medidos com os Sensores do Laboratório

Inclinômetro de Bolha	Inclinômetro Elétrico
-10.85	-10.85
-8.26	-8.27
-5.64	-5.69
-2.66	-2.71
2.86	2.89
5.34	5.35
7.46	7.45
10.68	10.67

4. 2. Análise das Respostas do Pêndulo

A análise das respostas do pêndulo foi realizada a partir de uma metodologia desenvolvida anteriormente e empregada em um projeto realizado para estimar o deslocamento relativo entre duas garrafas instaladas em um *riser* da plataforma P33 [1], a qual é apresentada a seguir. Visando dar abrangência a metodologia, esta foi desenvolvida inicialmente para a instalação de garrafas em um *riser*.

4. 2.1 Metodologia Utilizada para Análise

A primeira etapa é definir os ângulos entre o *riser* e a garrafa de medição. Os eixos (X, Y e Z) mostrados nas Figuras 4.6 a 4.8 são os eixos da garrafa e R é o eixo axial do riser.

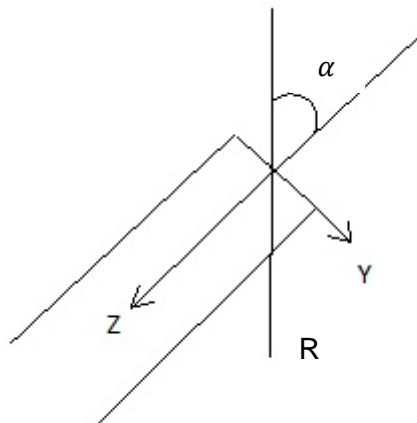


Figura 4.6- Definição do ângulo α [1]

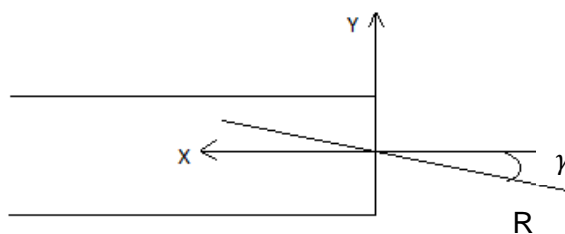


Figura 4.7- Definição do ângulo γ [1]

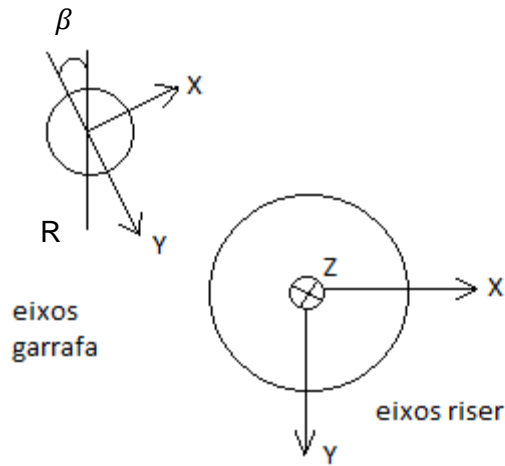


Figura 4.8 - Definição do ângulo β [1]

Os ângulos alpha ($\bar{\alpha}$) e beta ($\bar{\beta}$) são estimados a partir das médias das acelerações das garrafas através das equações:

$$\bar{\alpha} = \tan^{-1} \left(\frac{(\bar{X}^2 + \bar{Y}^2)^{0.5}}{\bar{Z}} \right) \quad (\text{Eq.4.1})$$

$$\bar{\beta} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{X}}{\bar{Y}} \right) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

onde,

\bar{X} , \bar{Y} e \bar{Z} são os valores médios das acelerações no referencial da garrafa.

A partir do ângulo β , pode-se obter as séries temporais das velocidades angulares em torno do eixo X ($\dot{\alpha}_R$) e do eixo Y ($\dot{\gamma}_R$) no referencial do riser através de:

$$\dot{\alpha}_R = \dot{\alpha} \cos(\bar{\beta}) - \dot{\gamma} \cos(\bar{\beta}) \quad (\text{Eq.4.3})$$

$$\dot{\gamma}_R = \dot{\alpha} \sin(\bar{\beta}) + \dot{\gamma} \cos(\bar{\beta}) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde,

$\dot{\alpha}$ é o valor da velocidade angular em torno do eixo X no referencial da garrafa em um instante de tempo.

$\dot{\gamma}$ é o valor da velocidade angular em torno do eixo Y no referencial da garrafa em um instante de tempo.

No caso do pêndulo, o valor de $\bar{\beta}$ é constante, pois o pêndulo se move em uma só direção e o valor de $\dot{\gamma}_R$ é nulo pois não há rotação entre os eixos.

As séries temporais dos ângulos alpha (α) e gama (γ) no eixo referencial do riser, ou neste caso de estudo, nas direções principais do pêndulo, são calculadas a partir das equações:

$$\alpha = \bar{\alpha} + \int \dot{\alpha}_R \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$\gamma = \int \dot{\gamma}_R \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Para calcular as acelerações no referencial do pêndulo, tem-se inicialmente que descontar o efeito da aceleração da gravidade nas medidas realizadas, isto é realizado de acordo com as Equações 4.7, 4.8 e 4.9.

$$\ddot{Z}_C = (\ddot{Z} - (-g) \cos(\alpha)) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$\ddot{Y}_C = (\ddot{Y} - (-g) \sin(\alpha)) \cos(\bar{\beta}) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

$$\ddot{X}_C = (\ddot{X} - (-g) \sin(\alpha)) \text{sen}(\bar{\beta}) \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Assim, a partir desses resultados, pode-se calcular as séries temporais das acelerações no referencial do pêndulo através das equações:

$$\ddot{Z}_R = -\ddot{Z}_C \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$\ddot{Y}_R = \ddot{Y}_C \cos(\bar{\beta}) + \ddot{X}_C \text{sen}(\bar{\beta}) \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$\ddot{X}_R = \ddot{X}_C \cos(\bar{\beta}) - \ddot{Y}_C \text{sen}(\bar{\beta}) \quad (\text{Eq. 4.12})$$

Para se obter as acelerações nos eixos globais (X_G , Y_G e Z_G), primeiramente deve-se girar Z e X em relação a γ como é mostrado nas Equações 4.13 e 4.14.

$$\ddot{X}_G = \ddot{X}_R \cos(\gamma) + \ddot{Z}_R \text{sen}(\gamma) \quad (\text{Eq. 4.13})$$

$$\ddot{Z}_R^* = \ddot{X}_R \cos(\gamma) + \ddot{X}_R \cos(\gamma) \quad (\text{Eq. 4.14})$$

E depois girar Z e Y em relação a α de acordo com as equações:

$$\ddot{Z}_G = \ddot{Y}_R \cos(\alpha) - \ddot{Z}_R^* \text{sen}(\alpha) \quad (\text{Eq. 4.15})$$

$$\ddot{Y}_G = \ddot{Y}_R \text{sen}(\alpha) - \ddot{Z}_R^* \text{cos}(\alpha) \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Integrando as equações 4.13, 4.15 e 4.16, obtêm-se as velocidades (\dot{X} e \dot{Y}) e os deslocamentos (X e Y). Para as integrações numéricas, foi utilizado o método de Newmark, que pode ser descrito através das seguintes expressões:

$$\dot{X}_{i+1} = \dot{X}_i + [(1 - \beta)\ddot{X}_i + \beta\ddot{X}_{i+1}]\Delta t \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$X_{i+1} = X_i + \dot{X}_i\Delta t + [(0.5 - \alpha)\ddot{X}_i + \alpha\ddot{X}_{i+1}]\Delta t^2 \quad (\text{Eq. 4.18})$$

onde,

X , \dot{X} e \ddot{X} são deslocamento, velocidade e aceleração;

Δt é o intervalo de tempo;

i é o instante da análise;

α e β - constantes para aumentar a estabilidade do processo de integração, sendo usualmente utilizado $\alpha= 1/6$ e $\beta=1/2$.

Finalmente, pode-se obter os deslocamentos na direção longitudinal e transversal do *riser* através das seguintes equações:

$$D_L = Z_G \text{cos}(\alpha) + Y_G \text{sen}(\alpha) \quad (\text{Eq. 4.19})$$

$$D_T = Y_G \text{cos}(\alpha) - Z_G \text{sen}(\alpha) \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Devido ao fato das garrafas estarem fora do eixo de rotação do pêndulo e em alturas distintas em relação ao pivô, as comparações entre os resultados não puderam ser realizadas diretamente, sendo necessário desenvolver uma metodologia que fornecesse acelerações e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura do pêndulo a partir da rotação e deslocamento da parte móvel. A Figura 4.9 apresenta esquematicamente as principais direções e acelerações que agem no pêndulo.

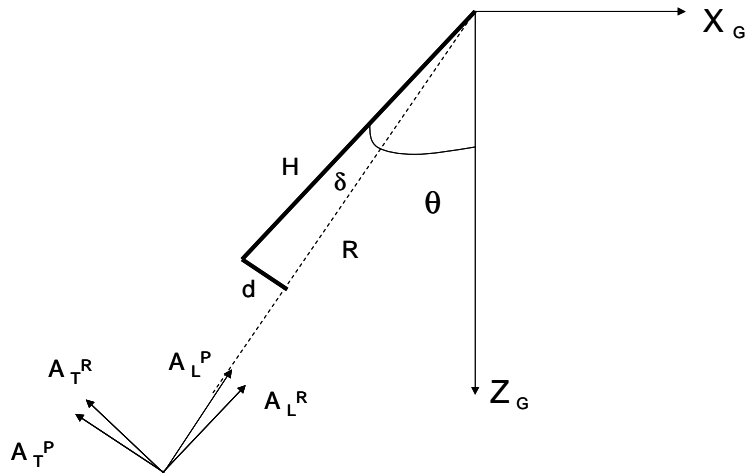


Figura 4.9 – Características principais do pêndulo

onde,

A_T^P e A_L^P - Acelerações Transversal e Longitudinal do referencial P

$\dot{\theta}$ e $\ddot{\theta}$ – Velocidade e aceleração angular

R – Distância do ponto ao pivô do pêndulo

δ - ângulo entre os referenciais P e R, que neste caso pode ser obtido através de:

$$\delta = \arctan\left(\frac{d}{H}\right)$$

d e H distâncias do ponto de análise.

Sendo as acelerações transversal e longitudinal definidas por:

$$A_T^P = \ddot{\theta}R$$

$$A_L^P = \dot{\theta}^2R$$

Como as garrafas foram montadas para que seus sensores fizessem as leituras segundo o referencial R, foi necessário realizar a rotação das acelerações para este referencial através das equações:

$$A_L^R = [A_L^P \cos(\delta) - A_T^P \sin(\delta)] + \ddot{\Delta} \quad (\text{Eq.4.21})$$

$$A_T^R = [A_L^P \sin(\delta) + A_T^P \cos(\delta)] \quad (\text{Eq. 4.22})$$

onde,

A_L^R e A_T^R - Acelerações Transversal e Longitudinal no referencial R

$\ddot{\Delta}$ - Aceleração da parte móvel do pêndulo. Esta será nula para as situações onde os sensores são fixados diretamente na estrutura;

As acelerações no eixo referencial X-Z são obtidas através das seguintes equações:

$$A_Z = -(A_L^R \cos(\theta) + A_T^R \sin(\theta)) \quad (\text{Eq. 4.23})$$

$$A_X = A_L^R \sin(\theta) - A_T^R \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 4.24})$$

A fim de evitar erros numéricos, ao invés de integrar as acelerações, os deslocamentos foram obtidos diretamente das Equações 4.25 e 4.26 no eixo referencial X-Z.

$$Z = R \cos(\theta - \delta) + \Delta \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 4.25})$$

$$X = R \sin(\theta - \delta) - \Delta \sin(\theta) \quad (\text{Eq. 4.26})$$

E de forma análoga obteve-se os deslocamentos no referencial R através de:

$$D_T^R = -X \cos(\theta) - Z \sin(\theta) \quad (\text{Eq.4.27})$$

$$D_L^R = -X \sin(\theta) - Z \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 4.28})$$

Assim, substituindo as Equações 4.25 e 4.26 em 4.27 e 4.28 e adotando as seguintes definições:

$$d = R \sin(\delta)$$

$$H = R \cos(\delta)$$

obtem-se:

$$D_T^R = d \quad (\text{Eq. 4.29})$$

$$D_L^R = H + \Delta \quad (\text{Eq. 4.30})$$

Deve-se ressaltar que d e H são constantes e somente Δ varia ao longo do tempo para a parte móvel, isto é, para a garrafa superior.

4.2.2 Análise do sinal das Garrafas

Neste item, o objetivo é avaliar as metodologias de filtragem dos sinais a fim de retirar as baixas frequências utilizando-se diferentes tipos de filtros implementados em uma situação mais próxima da real.

Os ensaios realizados constituíram em deslocar o pêndulo de sua posição de equilíbrio e deixá-lo vibrando livremente. A Figura 4.10 apresenta o ângulo α estimado para as garrafas fixa e móvel obtidos através das Equações 4.3 e 4.5. Percebe-se nesta figura que a parte oscilatória do sinal está acoplada a um sinal de baixa frequência mostrando a necessidade de aplicar um filtro. A fim de melhor entender este resultado é apresentado na Figura 4.11 o espectro do sinal. Neste, pode-se observar que a parte oscilatória do sinal (frequência natural) apresenta um valor em torno de 0.3 Hz. Enquanto que as componentes espúrias apresentam frequências próximas a 0.01 Hz.

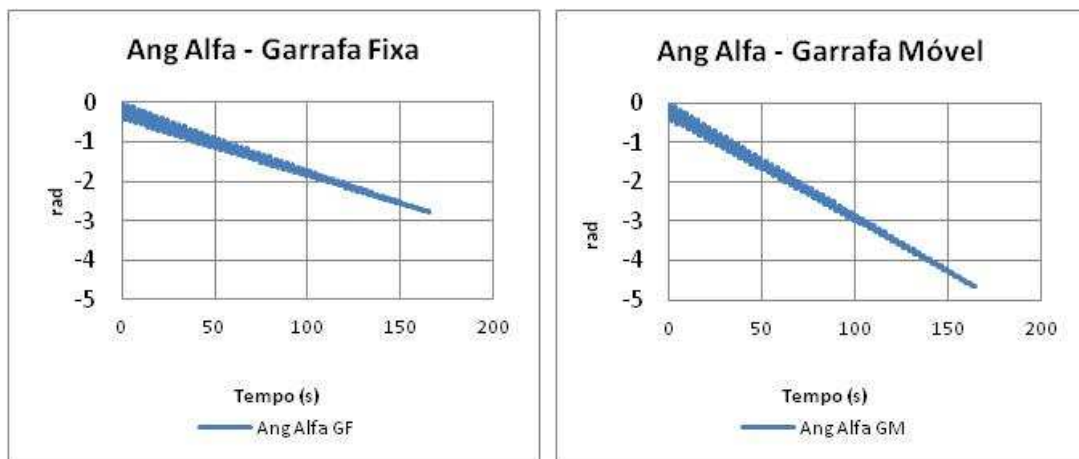


Figura 4.10 – Ângulo α da Garrafa Fixa e Móvel não filtrado

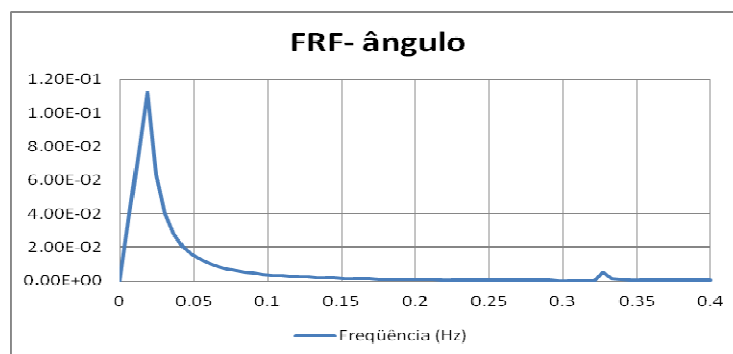


Figura 4.11 – Espectro de resposta do pêndulo

Como a frequência de vibração do pêndulo é em torno de 0.3 Hz em todas as análises apresentadas, neste item, foi utilizada uma frequência de corte em torno de 0.1 Hz, sendo os demais parâmetros utilizados nos filtros apresentados no Anexo 2.

Na Figura 4.12, é mostrada uma comparação entre o ângulo medido pelo inclinômetro e o ângulo das duas garrafas com o uso dos filtros descritos no capítulo 2. De uma forma geral, os ângulos obtidos com todos tipos de filtro apresentaram uma boa correlação com o medido diretamente. No caso do filtro FIR, houve um atraso do sinal que já era esperado conforme mostrado nas simulações numérica e experimental do capítulo 3.

Na Figura 4.13, são mostradas as acelerações em X, Y e Z obtidas a partir das Equações 4.7 a 4.9, pelas garrafas fixa e móvel, sem e com filtro do tipo *Wavelet*. Notou-se que os sinais não apresentam aparentemente componentes de baixa frequência, desta forma o sinal filtrado não apresenta muita diferença com o original. Este mesmo comportamento também foi observado para os demais tipos de filtro.

Na Figura 4.14, é mostrada a aceleração global de referência ($A_x G Ref$), a qual foi estimada teoricamente a partir das rotações medidas com o inclinômetro, comparada com a aceleração global obtida da garrafa fixa ($A_x Global GF$) estimada através da Equação 4.15. Existe uma excelente correlação entre o sinal medido e o filtrado para todos os tipos de filtro. Os sinais filtrados da garrafa móvel apresentam resultados similares e por esta razão não são apresentados.

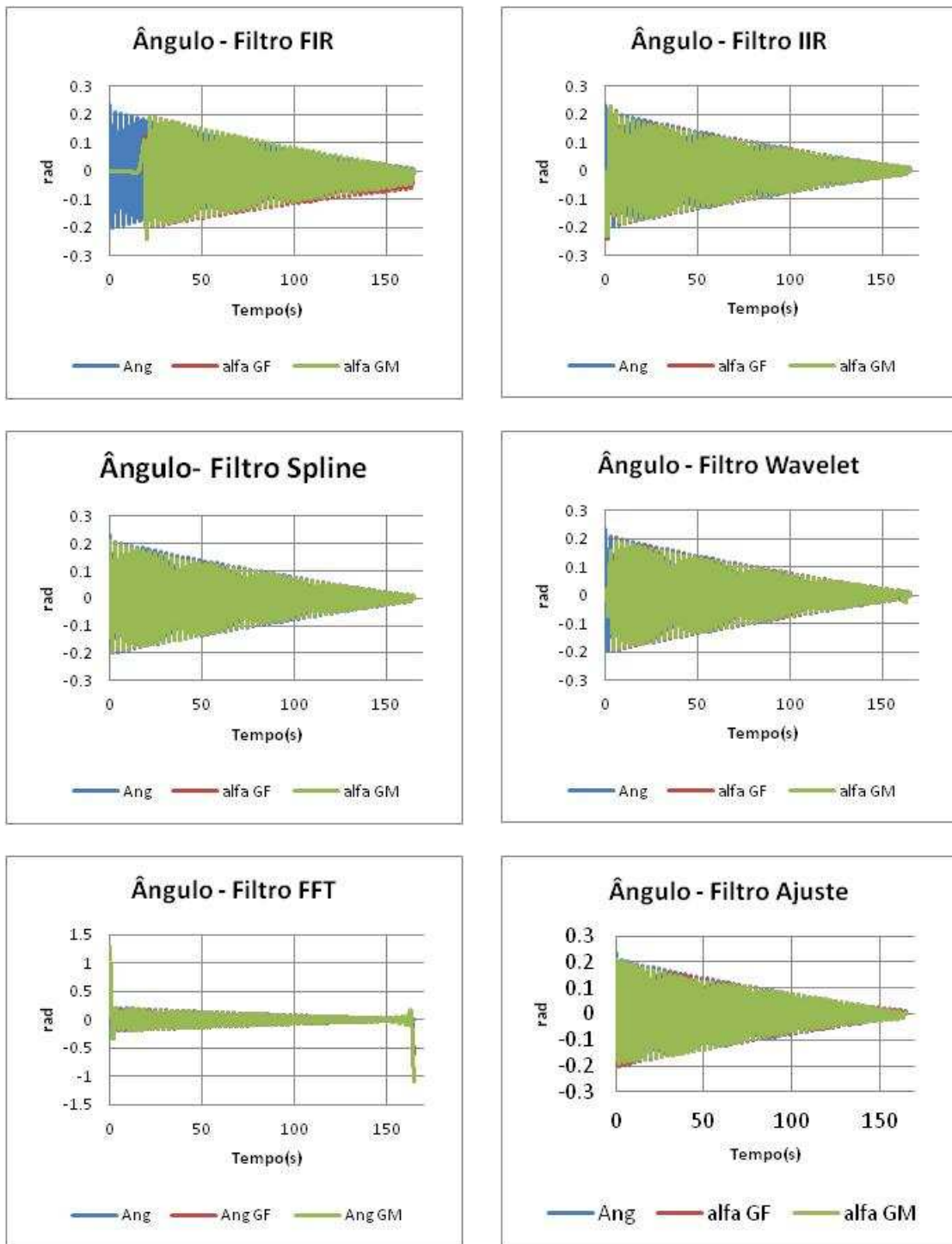


Figura 4.12 – Ângulo α da Garrafa Fixa (GF) e Móvel (GM) filtrados

Garrafa Fixa

Garrafa Móvel

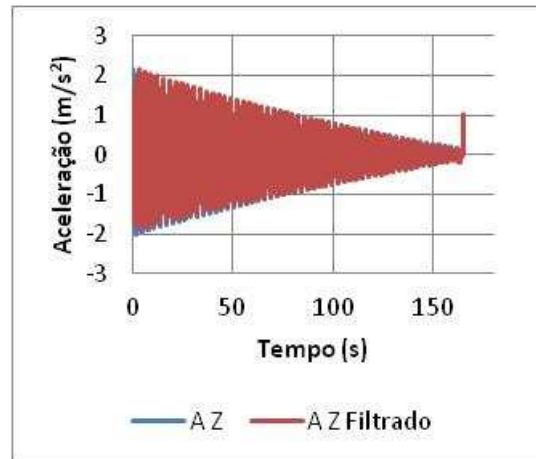
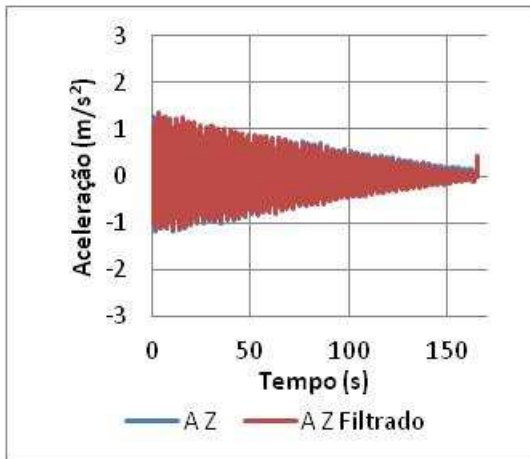
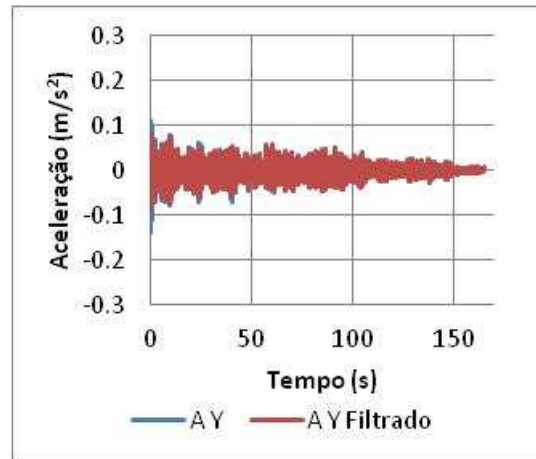
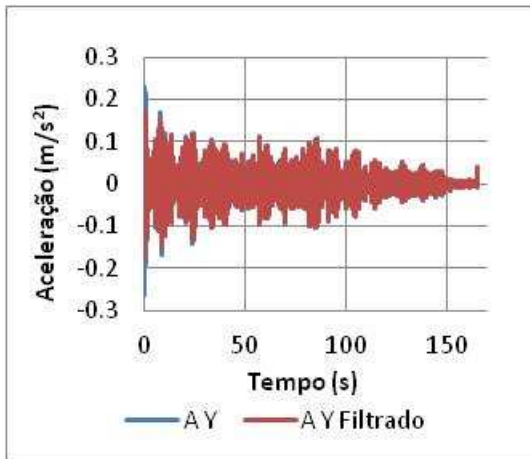
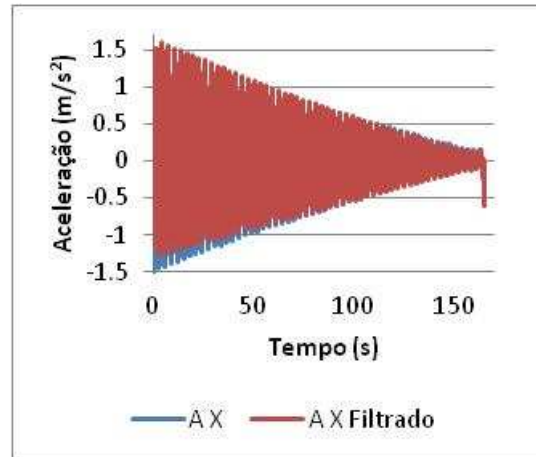
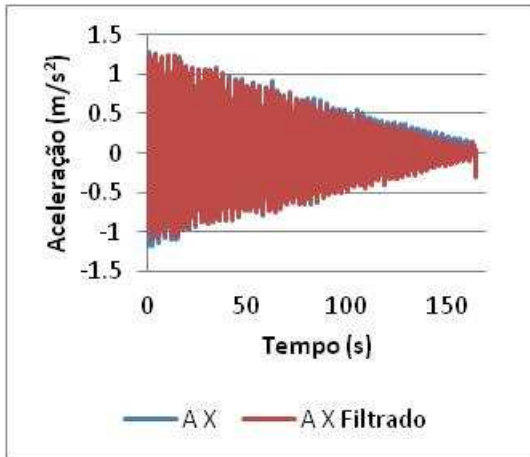


Figura 4.13 – Comparação entre acelerações filtradas (*Wavelet*) e não filtradas das garrafas fixa e móvel

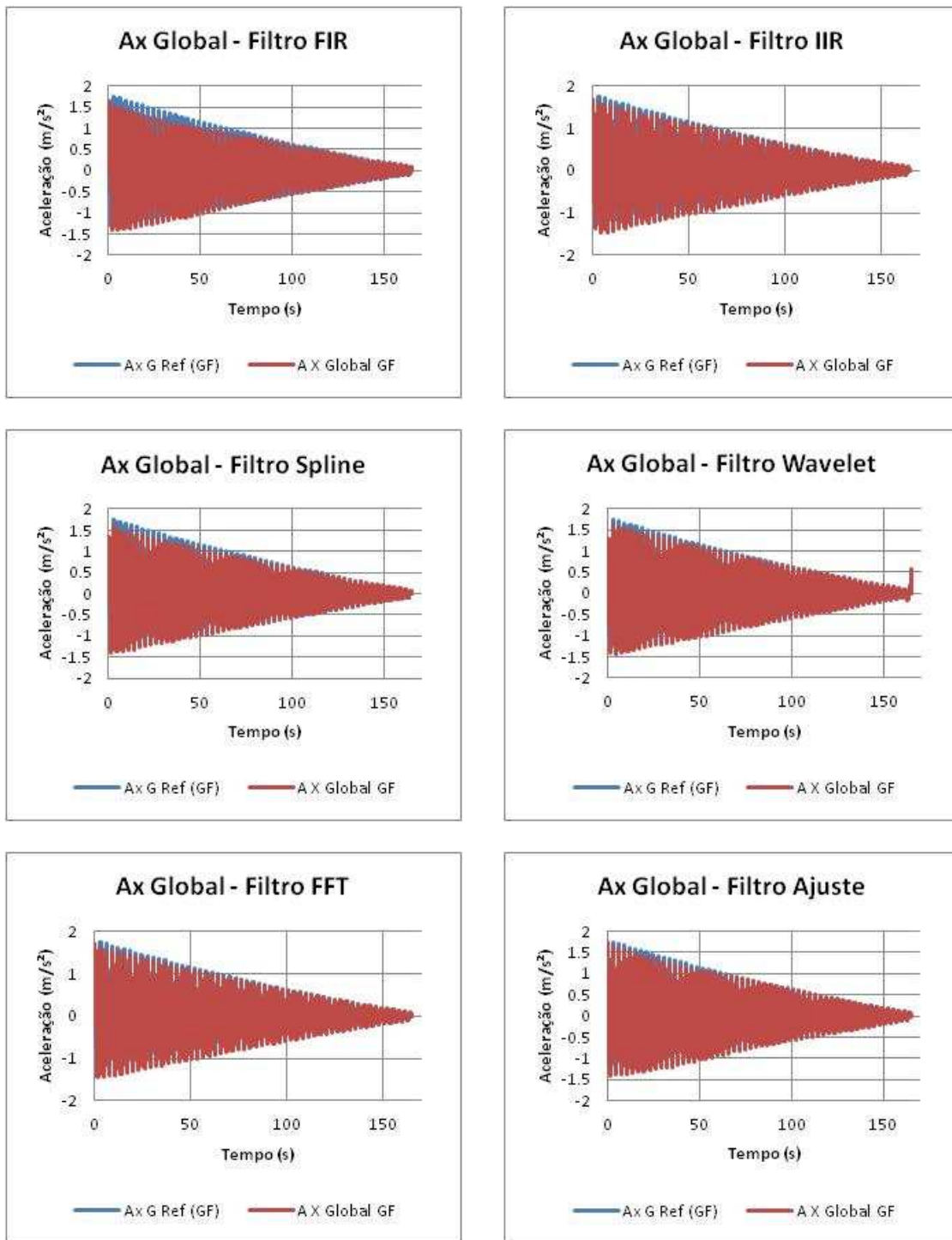


Figura 4.14- Aceleração A_x global medida e filtrada

O sinal de aceleração global do eixo Y (A_y Global), obtida a partir da Equação 4.16, é apresentado na Figura 4.15. A garrafa fixa não apresentou um ajuste satisfatório para todos os tipos de filtros empregados, provavelmente devido ao fato de que as acelerações medidas nesta garrafa apresentaram um nível maior de ruído do que as da garrafa móvel conforme pode ser observado na Figura 4.13. Este motivo pode explicar o

fato de que os sinais obtidos para a garrafa móvel apresentaram uma melhor correlação quando comparados ao sinal de aceleração de referência conforme pode ser visto na Figura 4.16, sendo que as melhores correlações foram obtidas para os filtros IIR e *Spline*.

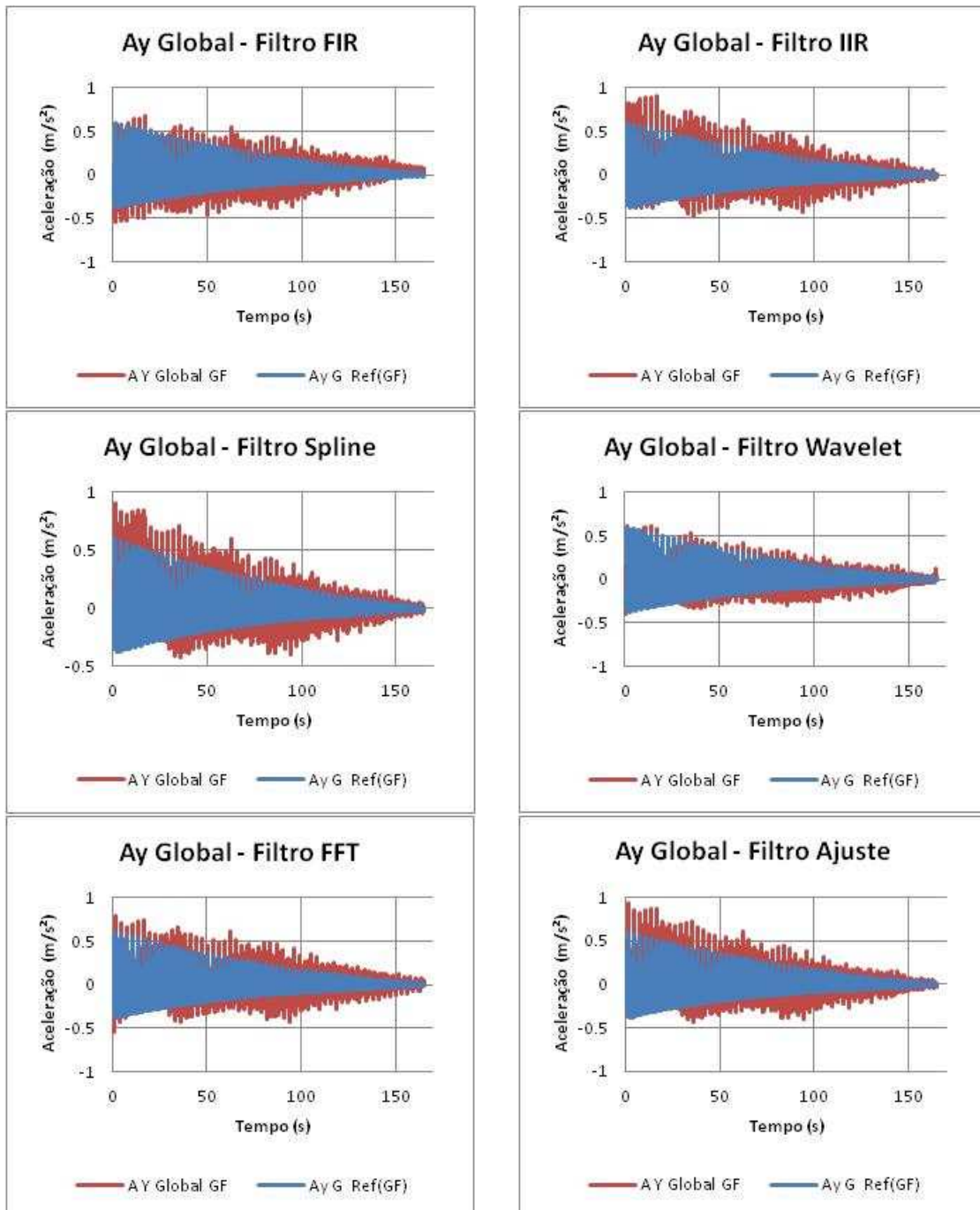


Figura 4.15- Aceleração Ay garrafa fixa medida e filtrada

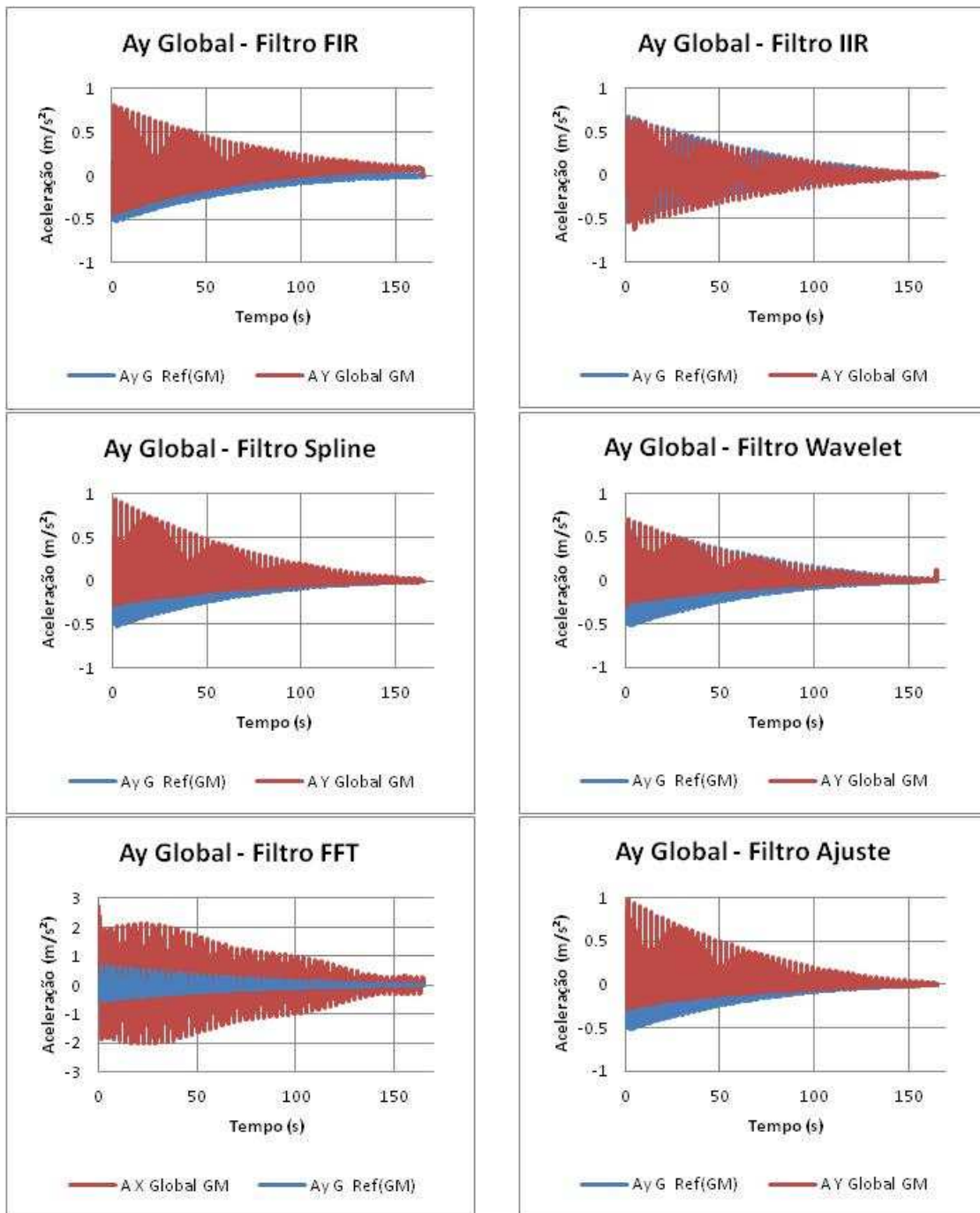
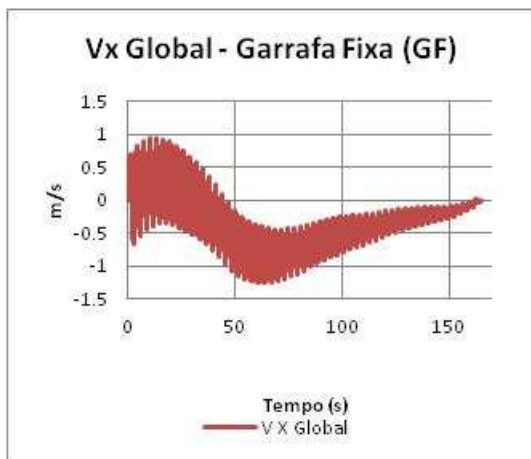
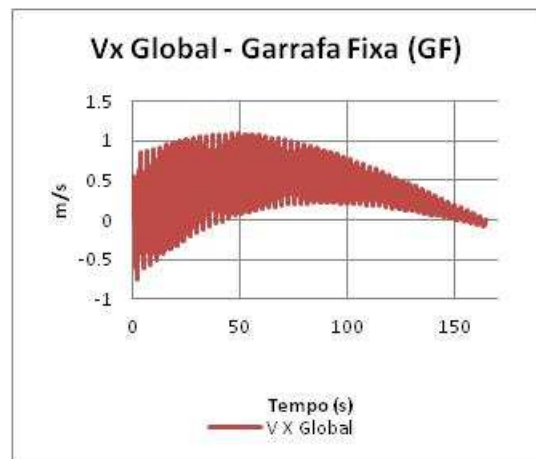


Figura 4.16- Aceleração A_y garrafa móvel medida e filtrada

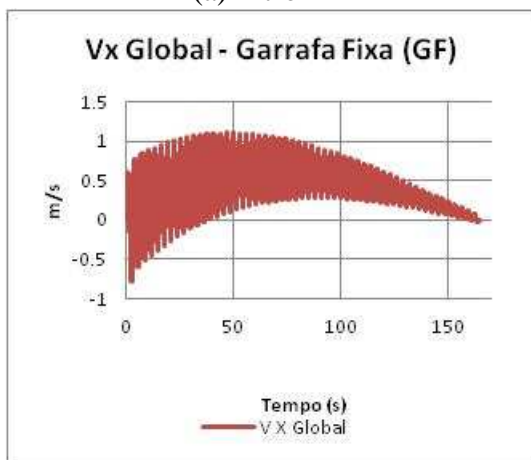
Após a filtragem e integração das Equações 4.13, 4.15 e 4.16, obtêm-se as velocidades nas direções X (V_x) e Y (V_y). As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam, respectivamente, para as garrafas fixa e móvel, as velocidades na direção X sem a utilização de filtros.



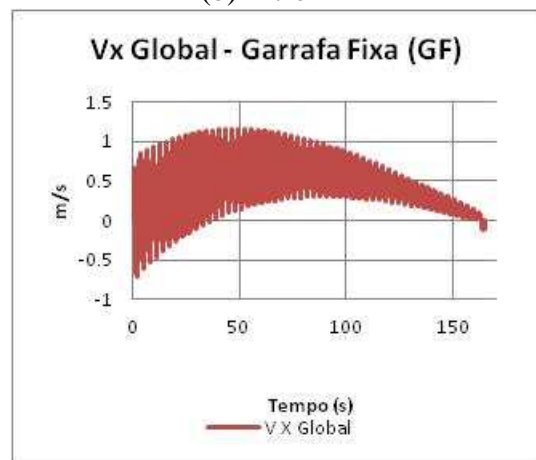
(a)Filtro FIR



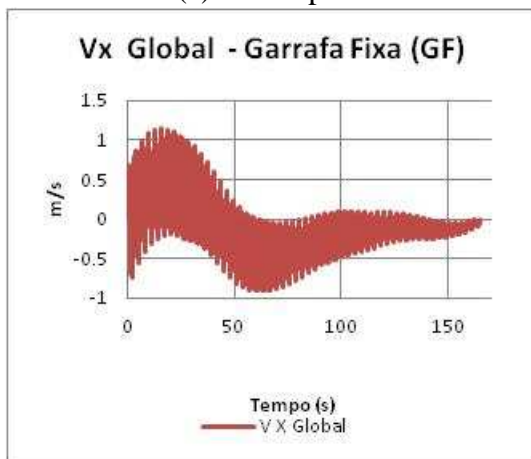
(b)Filtro IIR



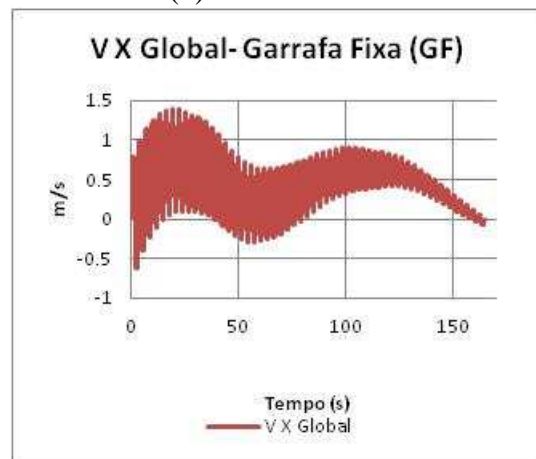
(c)Filtro Spline



(d)Filtro Wavelet



(e)Filtro FFT



(f) Filtro Ajuste

Figura 4.17 – Vx garrafa fixa sem uso do filtro.

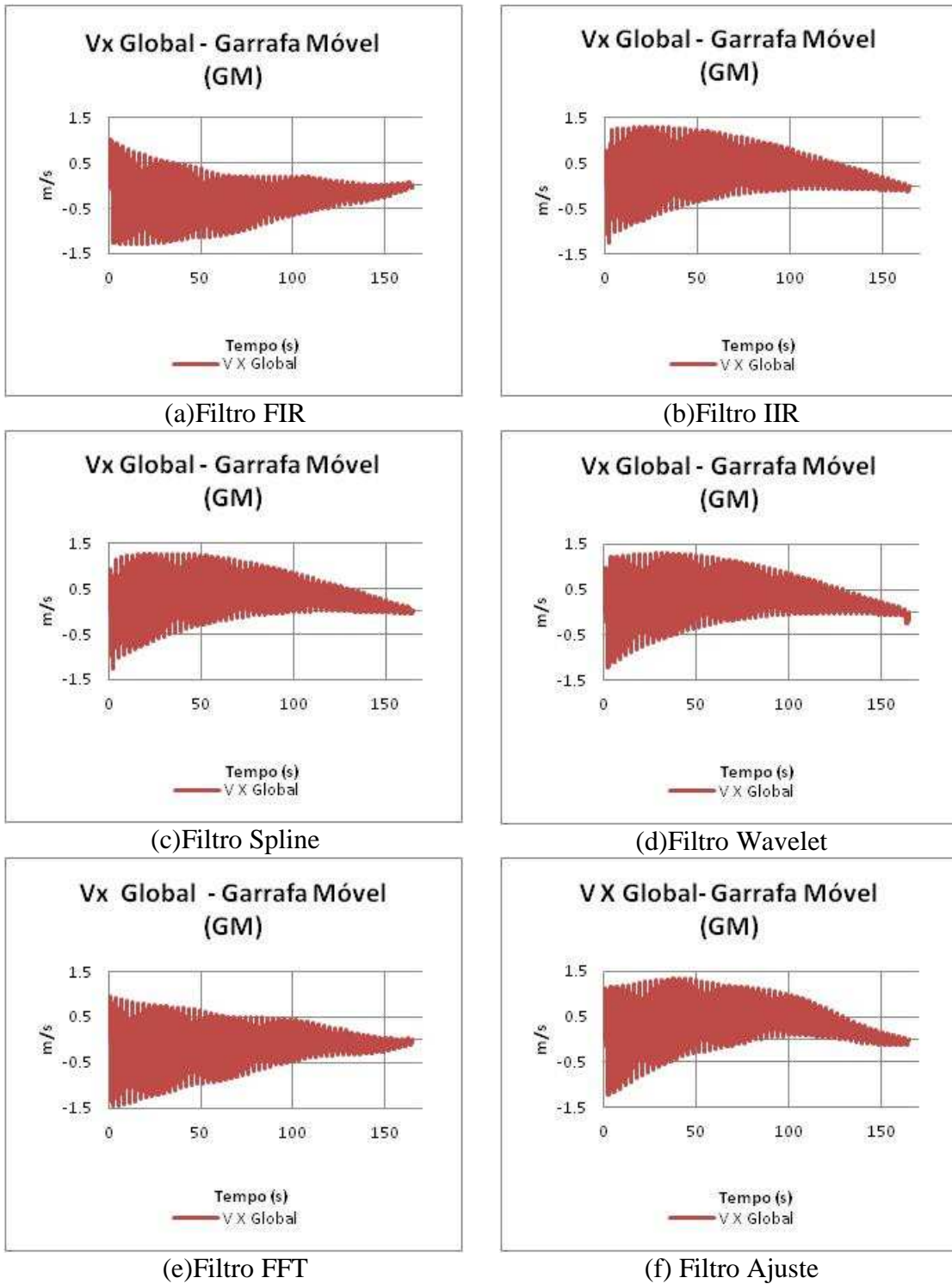


Figura 4.18 – V_x garrafa móvel sem uso do filtro.

As Figuras 4.19 e 4.20 mostram estes resultados com a utilização dos filtros comparados aos de referência. Conforme se pode observar nestas figuras, todos os filtros se correlacionaram bem com os de referência.

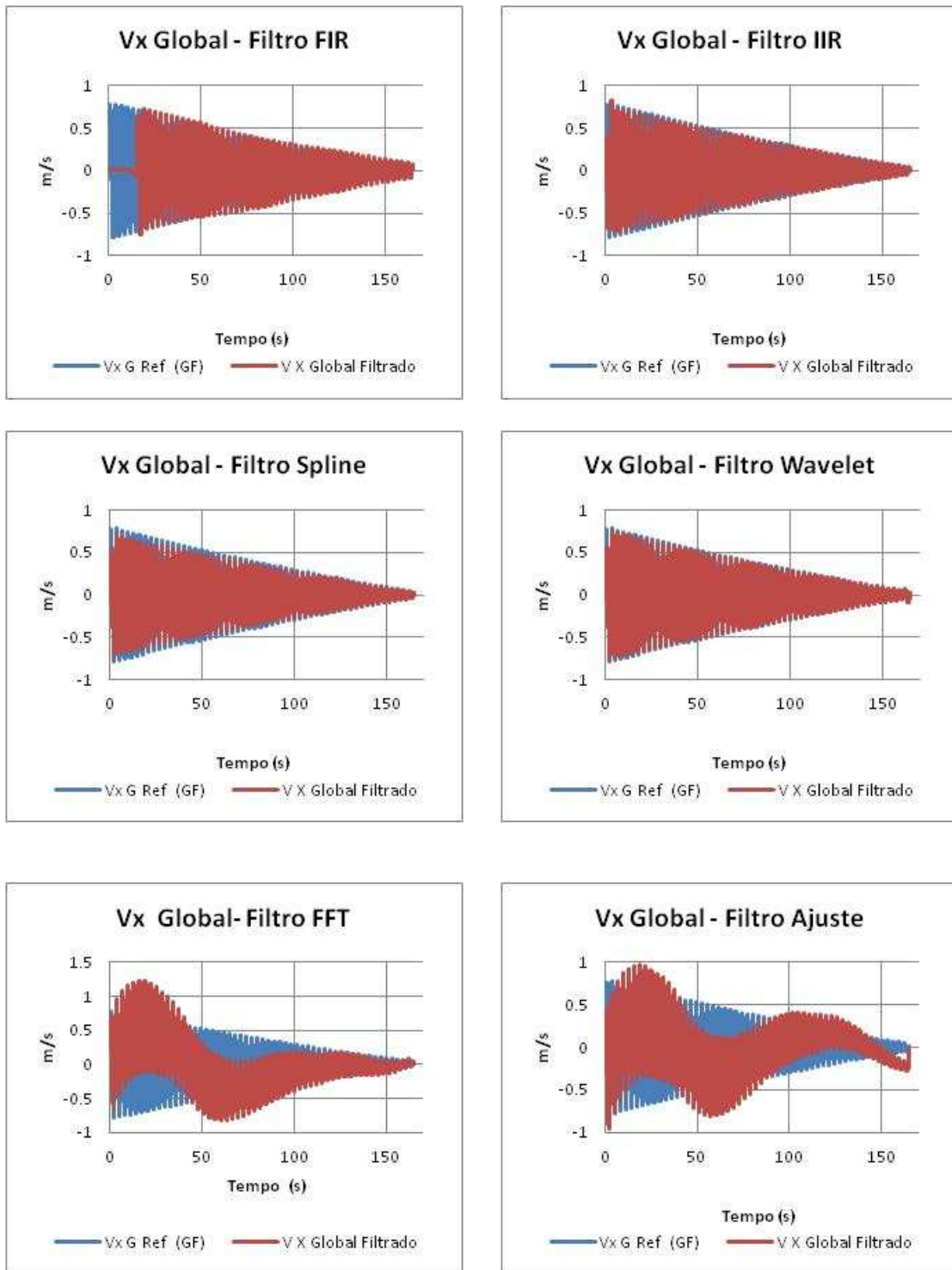


Figura 4.19 – V_x garrafa fixa com uso dos filtros

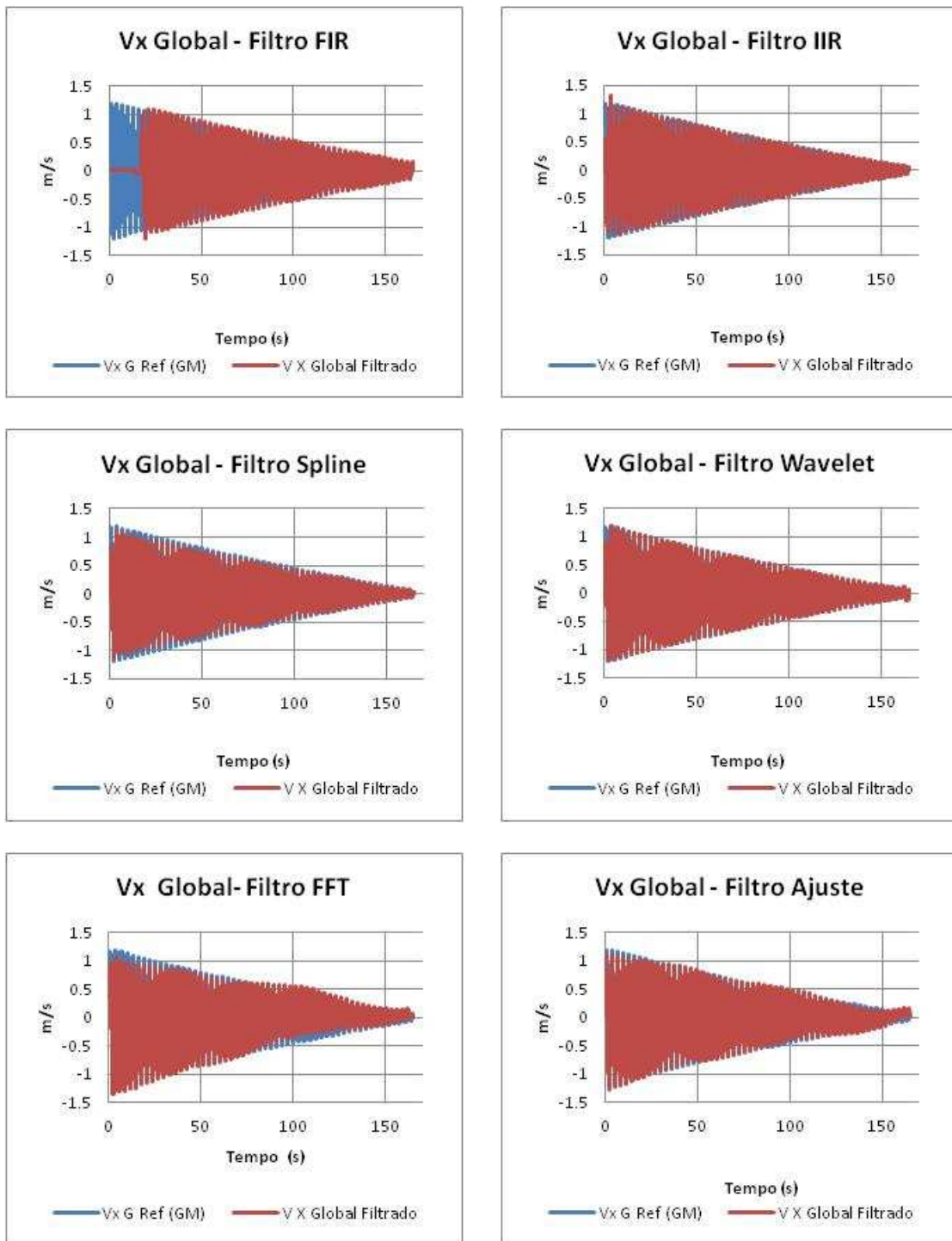
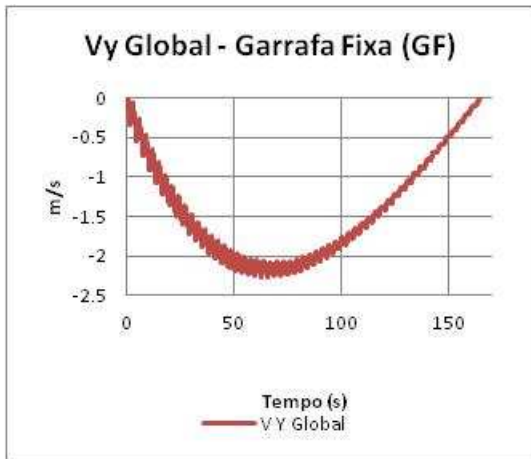
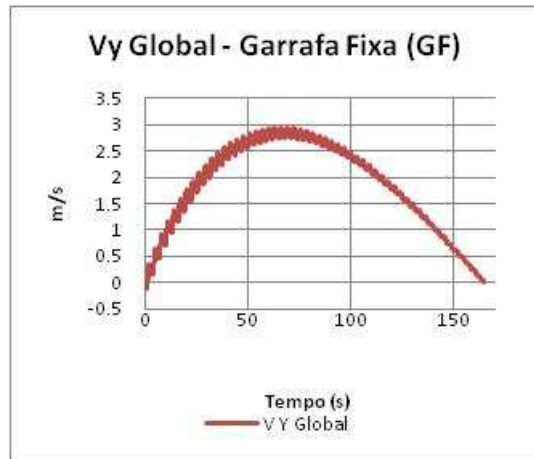


Figura 4.20 – V_x garrafa móvel com uso dos filtros

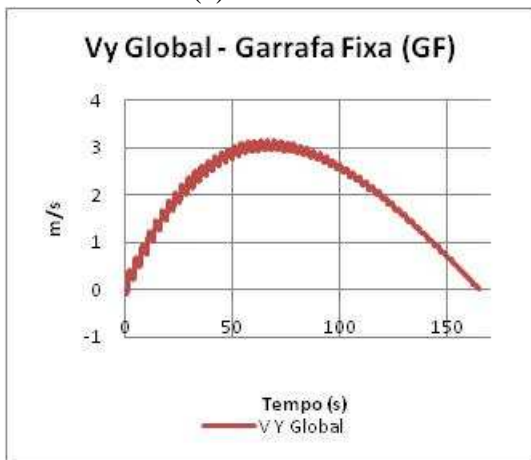
As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam, respectivamente, para as garrafas fixa e móvel, as velocidades na direção Y sem a utilização de filtros, enquanto as Figuras 4.23 e 4.24 mostram estes resultados com a utilização dos filtros comparados aos de referência



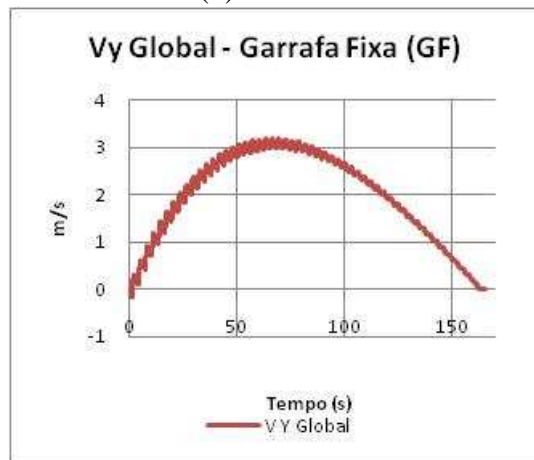
(a)Filtro FIR



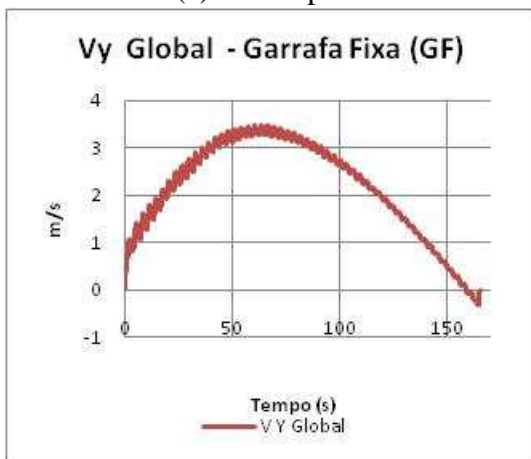
(b)Filtro IIR



(c)Filtro Spline



(d)Filtro Wavelet



(e)Filtro FFT



(f) Filtro Ajuste

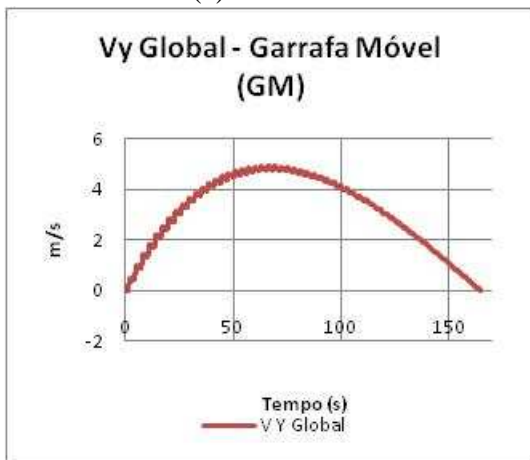
Figura 4.21 – Sinais de Vy da garrafa fixa não filtrado



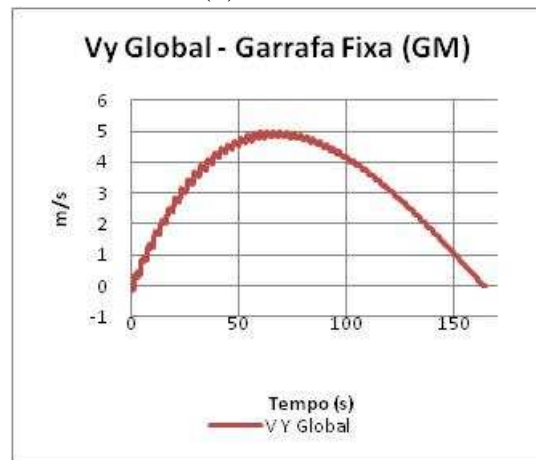
(a)Filtro FIR



(b)Filtro IIR



(c)Filtro Spline



(d) Filtro Wavelet



(e)Filtro FFT



(f) Filtro Ajuste

Figura 4.22 – Sinais de Vy da garrafa móvel não filtrado

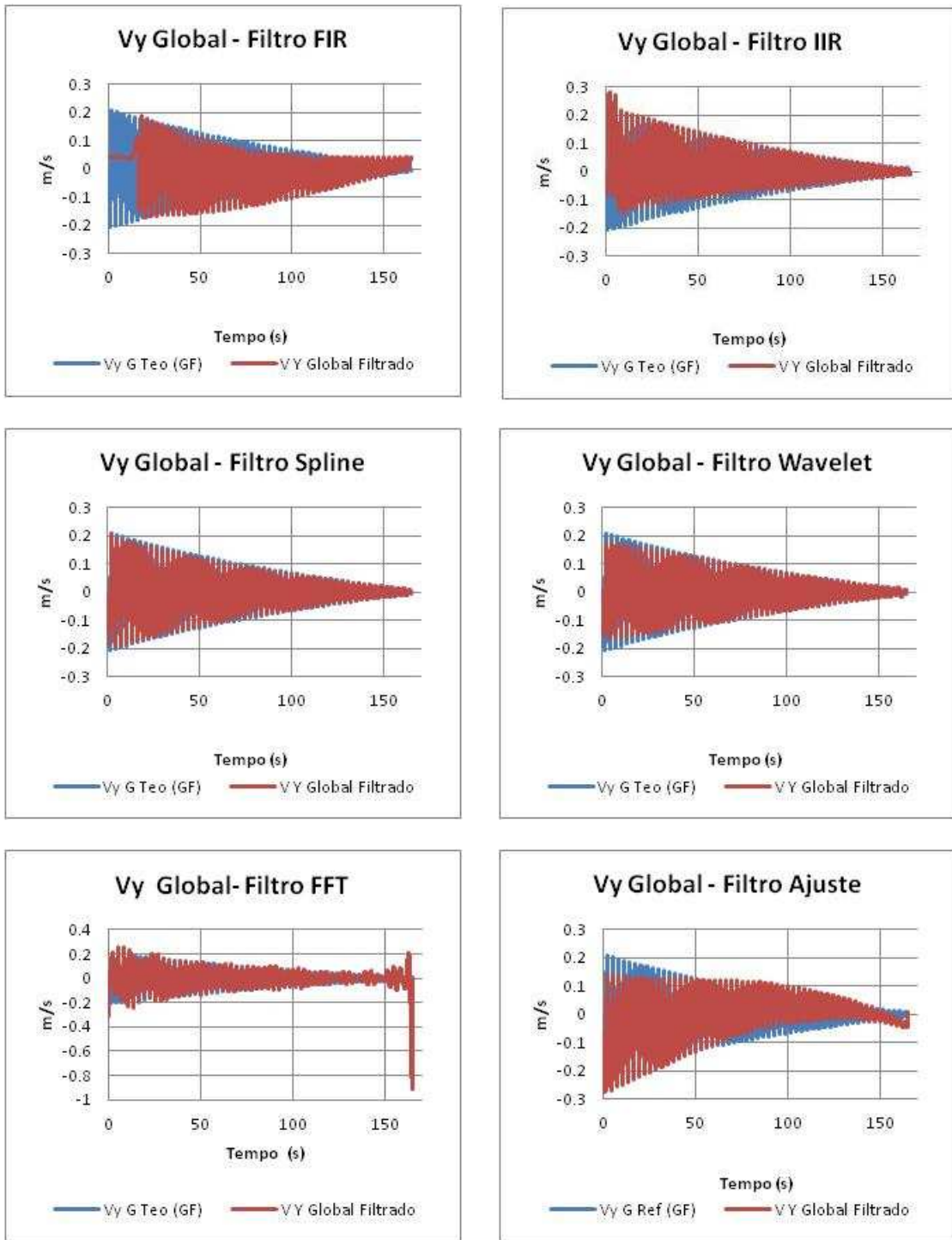


Figura 4.23– Sinais de V_y da garrafa fixa filtrado

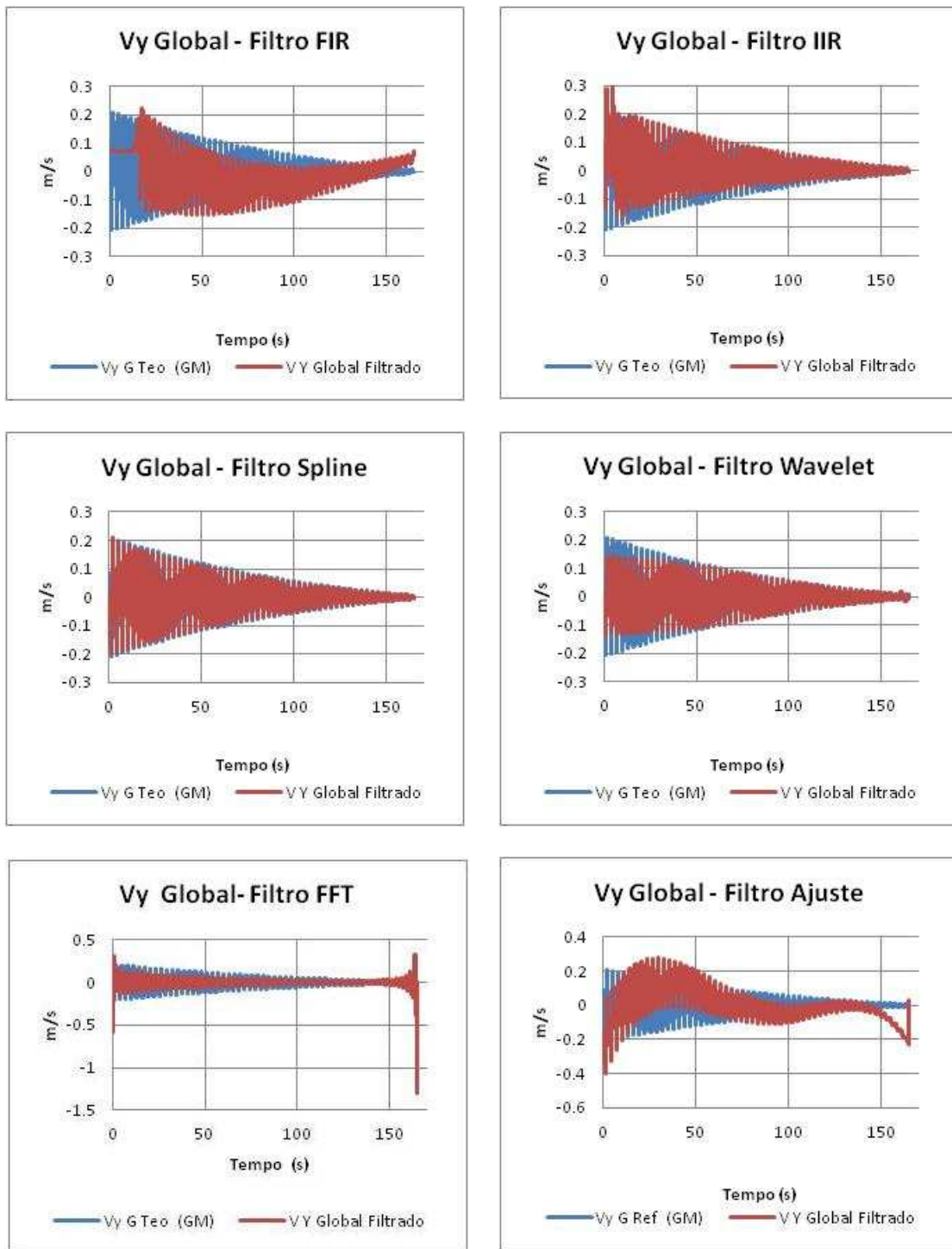


Figura 4.24 – Sinais de V_y da garrafa móvel filtrado

Observa-se na Figura 4.23 que a correlação obtida com os filtros dos tipos FIR e IIR foi razoável, enquanto para os demais filtros foi muito boa. Em relação à garrafa móvel, os filtros dos tipos *Spline* e *Wavelet* apresentaram resultados bem consistentes, enquanto os dos tipos FIR e IIR foram razoáveis e dos tipos FFT e Ajuste foram inconsistentes.

Filtrando e integrando pela segunda vez as equações 4.13, 4.15 e 4.16, obtém-se

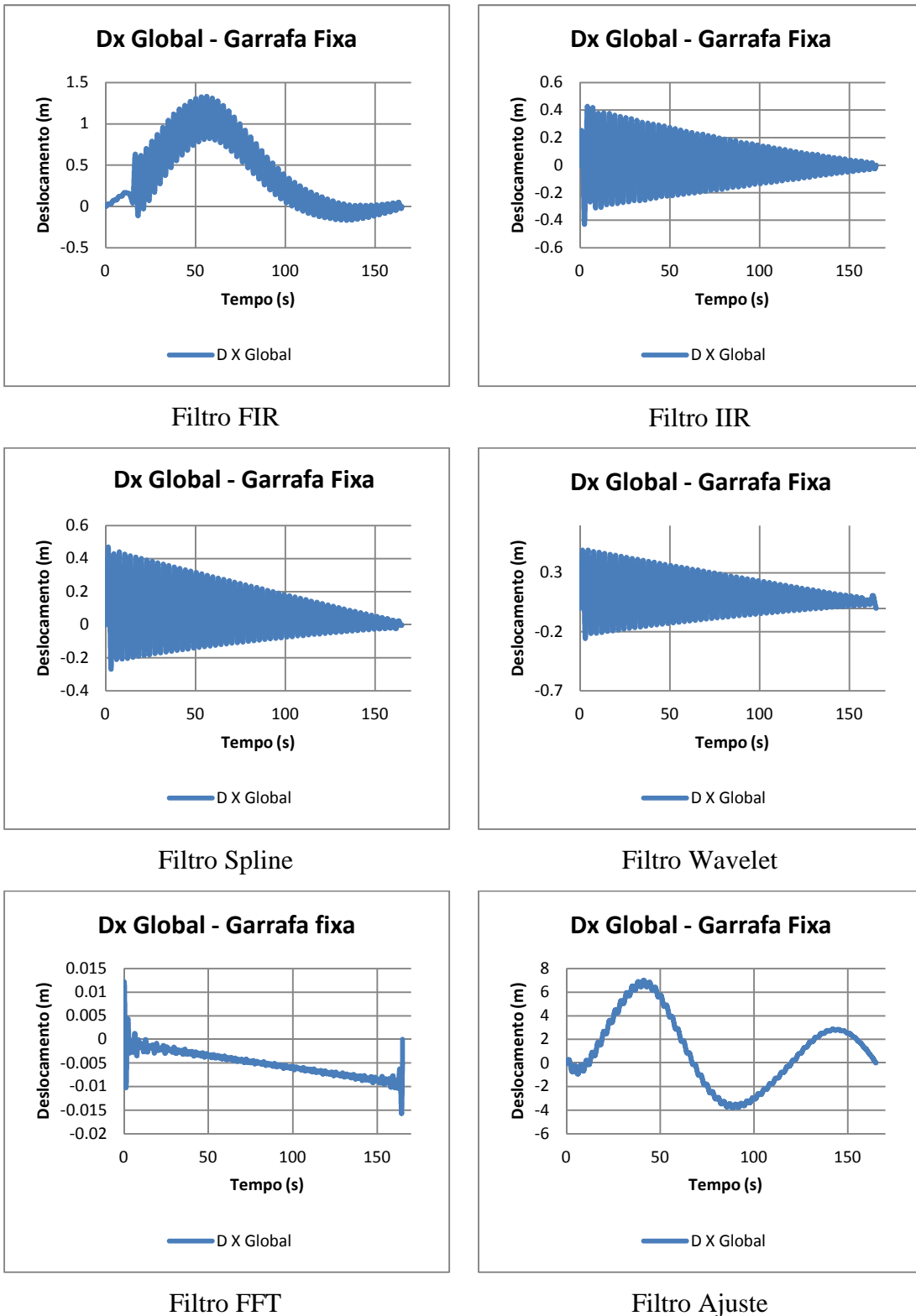
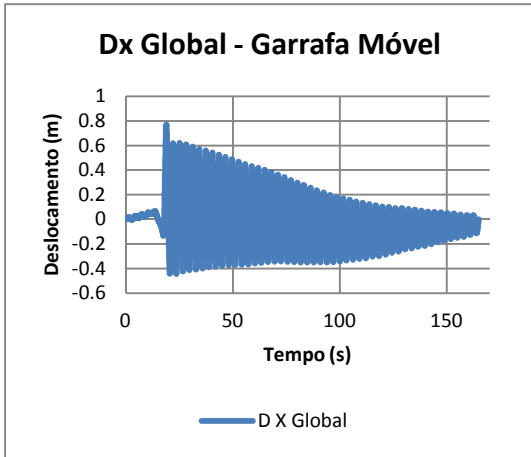
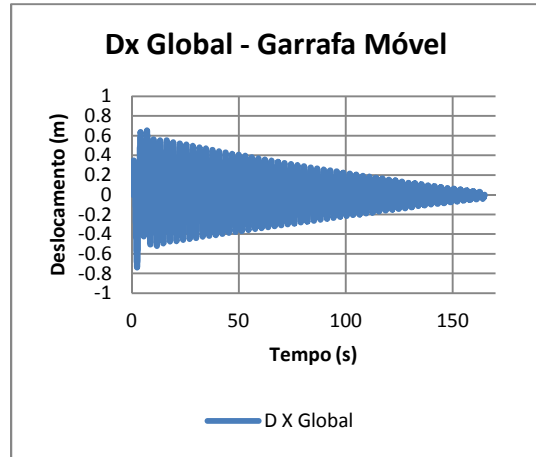


Figura 4.25 – Sinais de Dx da garrafa fixa não filtrado

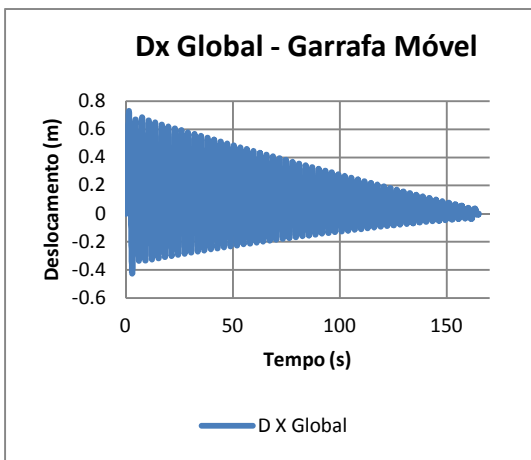
os deslocamentos nas direções X e Y. As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam o deslocamento global na direção X das garrafas fixa e móvel.



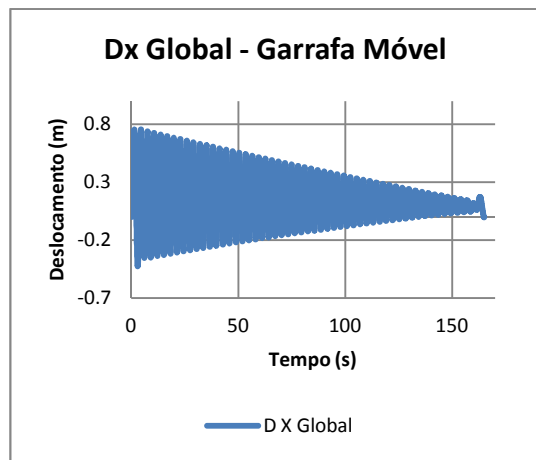
Filtro FIR



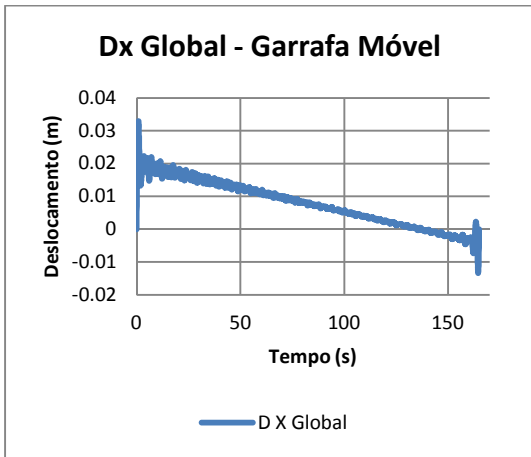
Filtro IIR



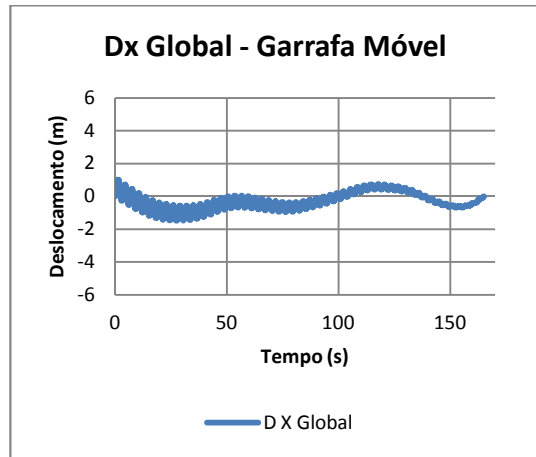
Filtro Spline



Filtro Wavelet



Filtro FFT



Filtro Ajuste

Figura 4.26 – Sinais de Dx no domínio do tempo da garrafa móvel não filtrado

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam a comparação desses sinais com o obtido da Equação 4.29, que é o sinal de referência. Tanto a garrafa fixa como a móvel, apresentaram defasagem nos sinais do filtro FIR e o filtro do tipo Ajuste se perdeu

completamente. Os demais filtros apresentaram uma excelente correlação com os de referência.

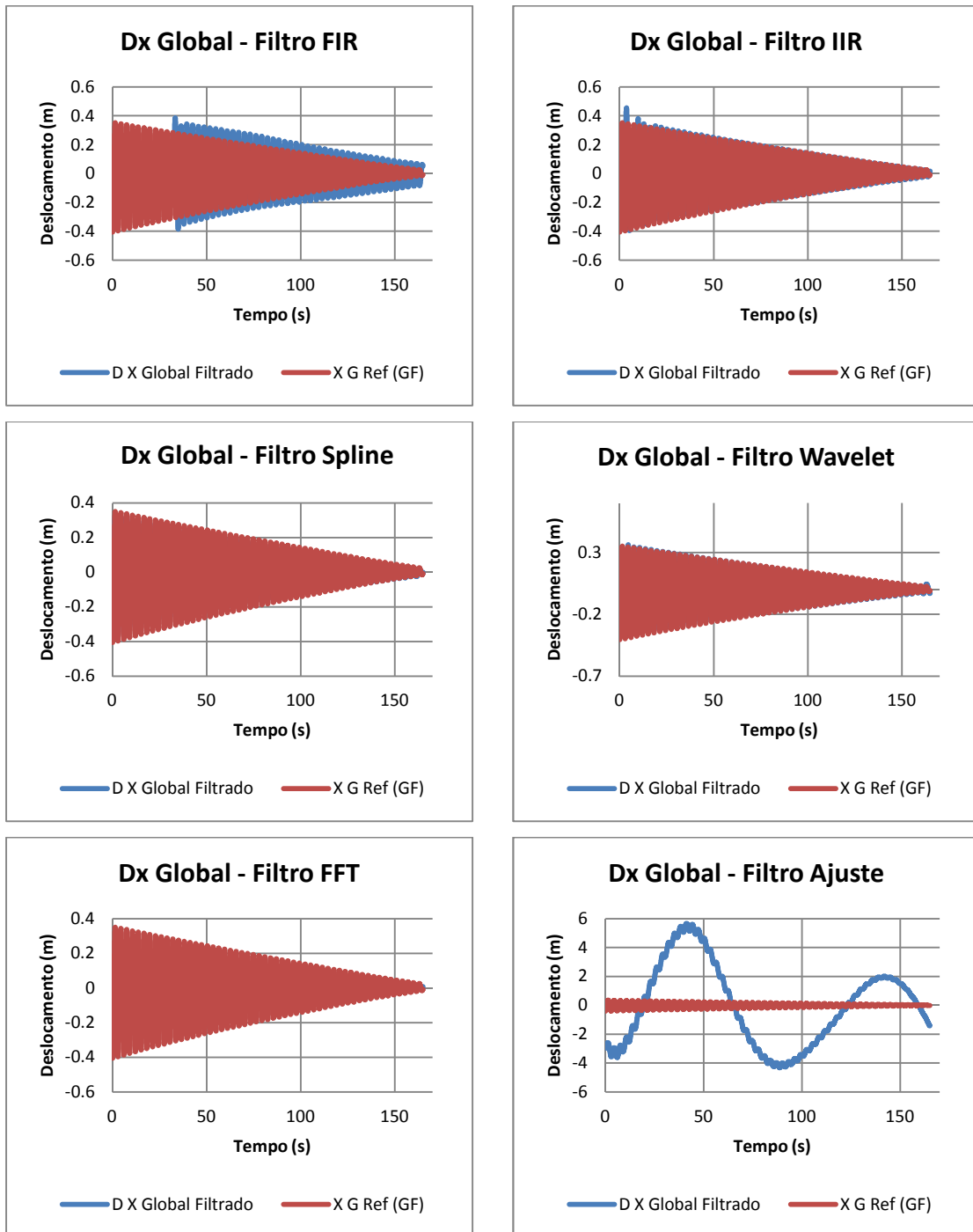


Figura 4.27– Sinais de Dx da garrafa fixa filtrado

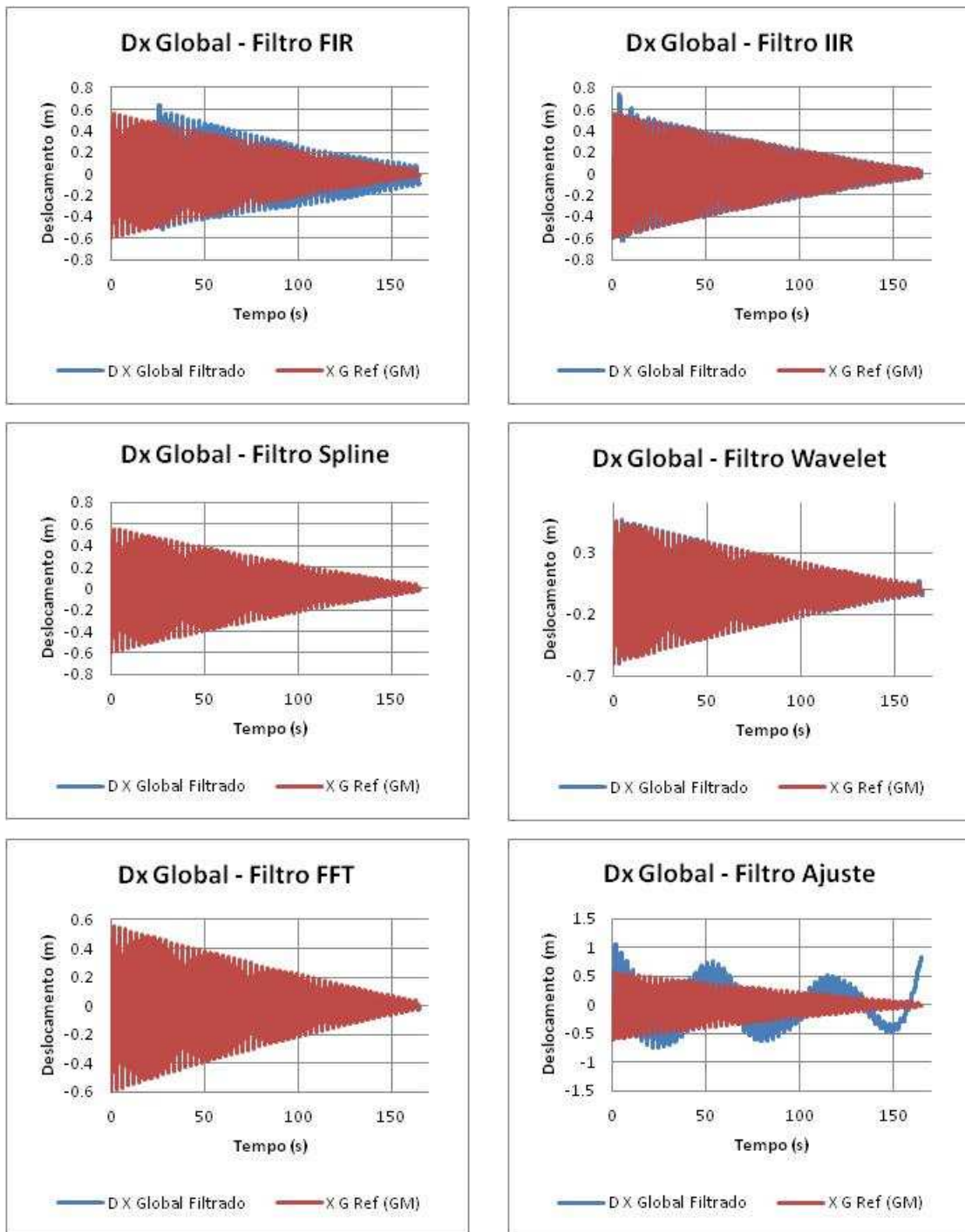
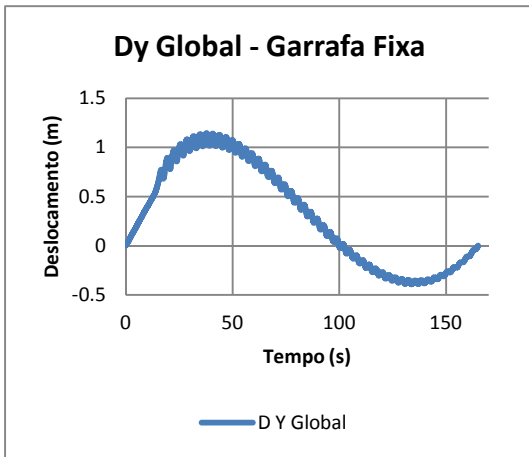
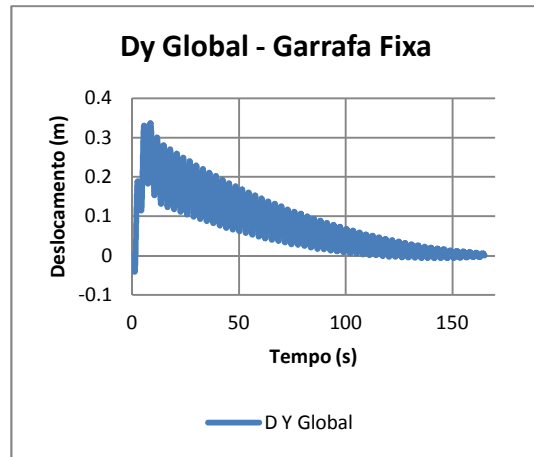


Figura 4.28– Sinais de Dx da garrafa móvel filtrado

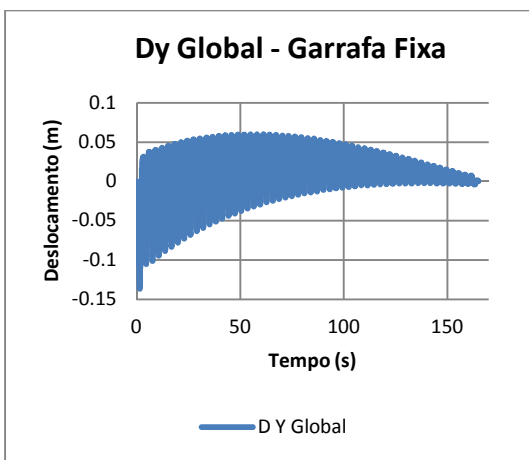
As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam o deslocamento global na direção Y das garrafas fixa e móvel.



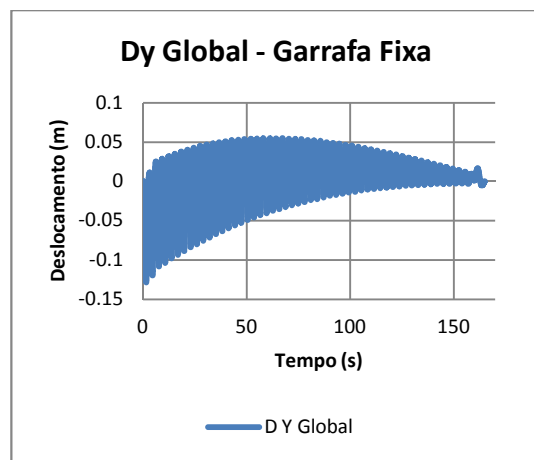
Filtro FIR



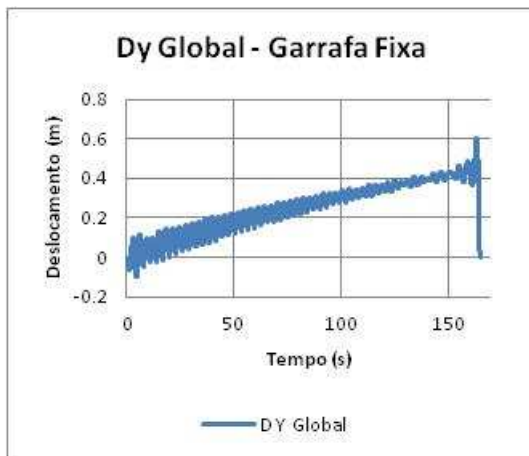
Filtro IIR



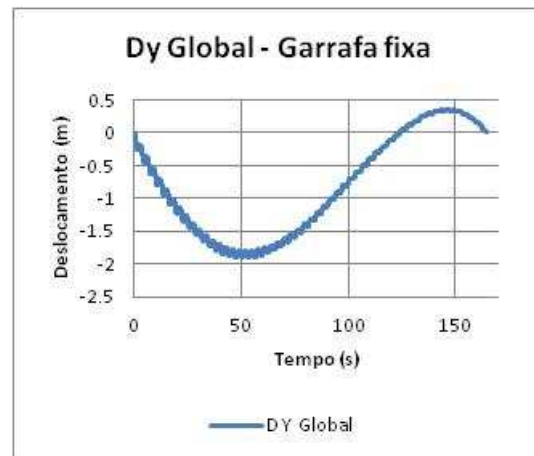
Filtro Spline



Filtro Wavelet

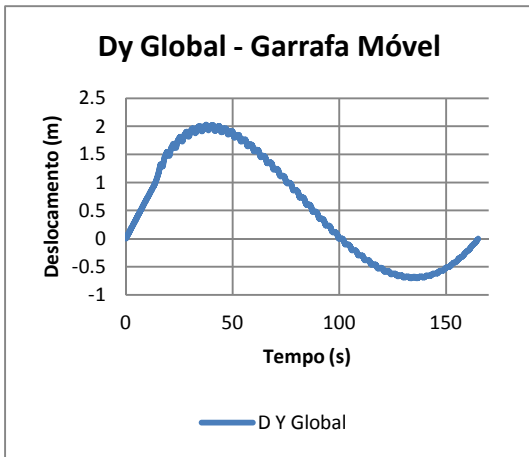


Filtro FFT

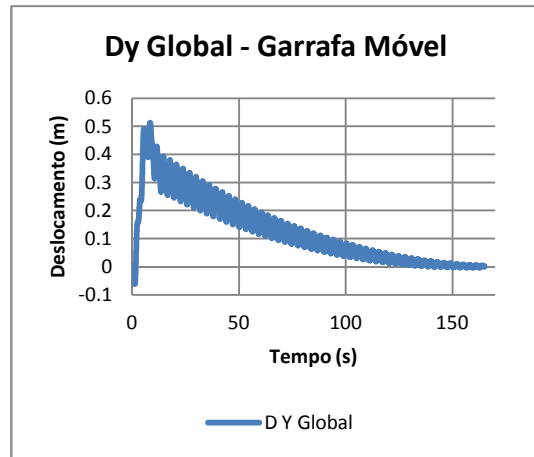


Filtro Ajuste

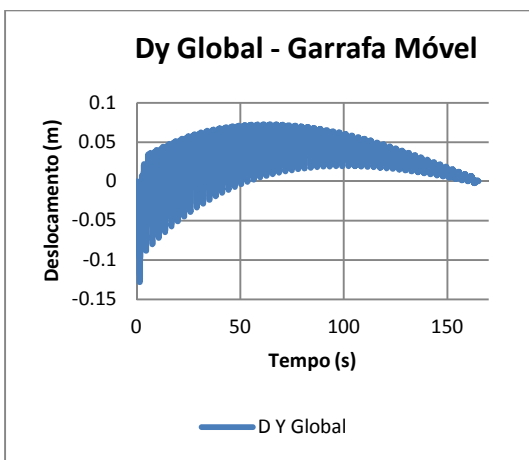
Figura 4.29– Sinais de Dy da garrafa fixa não filtrado



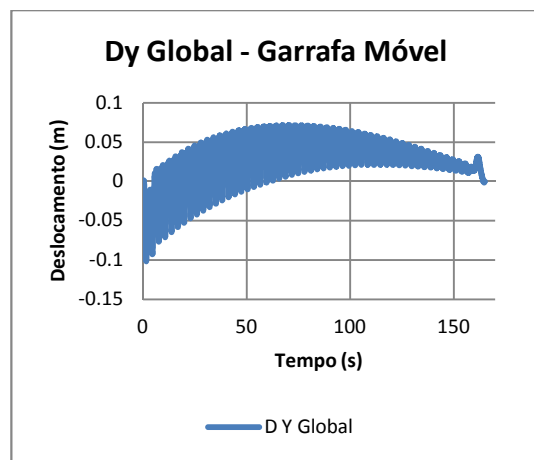
Filtro FIR



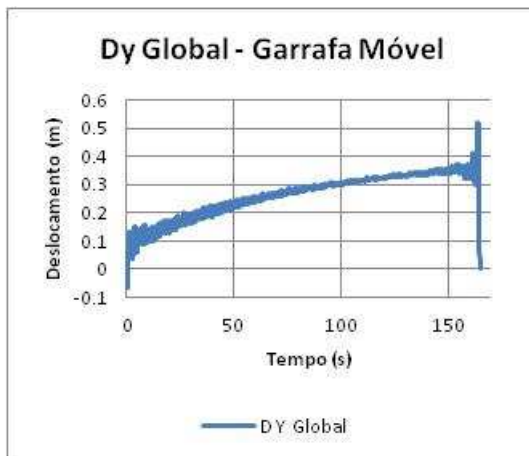
Filtro IIR



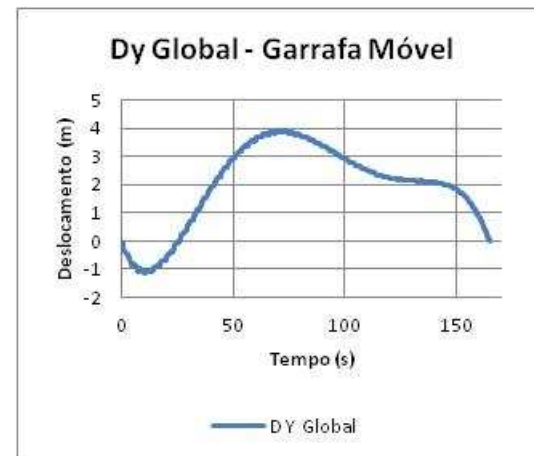
Filtro Spline



Filtro Wavelet



Filtro FFT



Filtro Ajuste

Figura 4.30– Sinais de Dy da garrafa móvel não filtrado

As Figuras 4.31 e 4.32 mostram a comparação desses sinais com o de referência. Houve inconsistência na comparação do sinal de referência com os sinais da garrafas fixa e móvel para os filtros FIR, IIR e Ajuste. Os deslocamentos obtidos com os demais

filtros se correlacionaram muito bem com os de referência, com exceção do filtro tipo FFT que apresenta um aumento de amplitude no final do sinal.

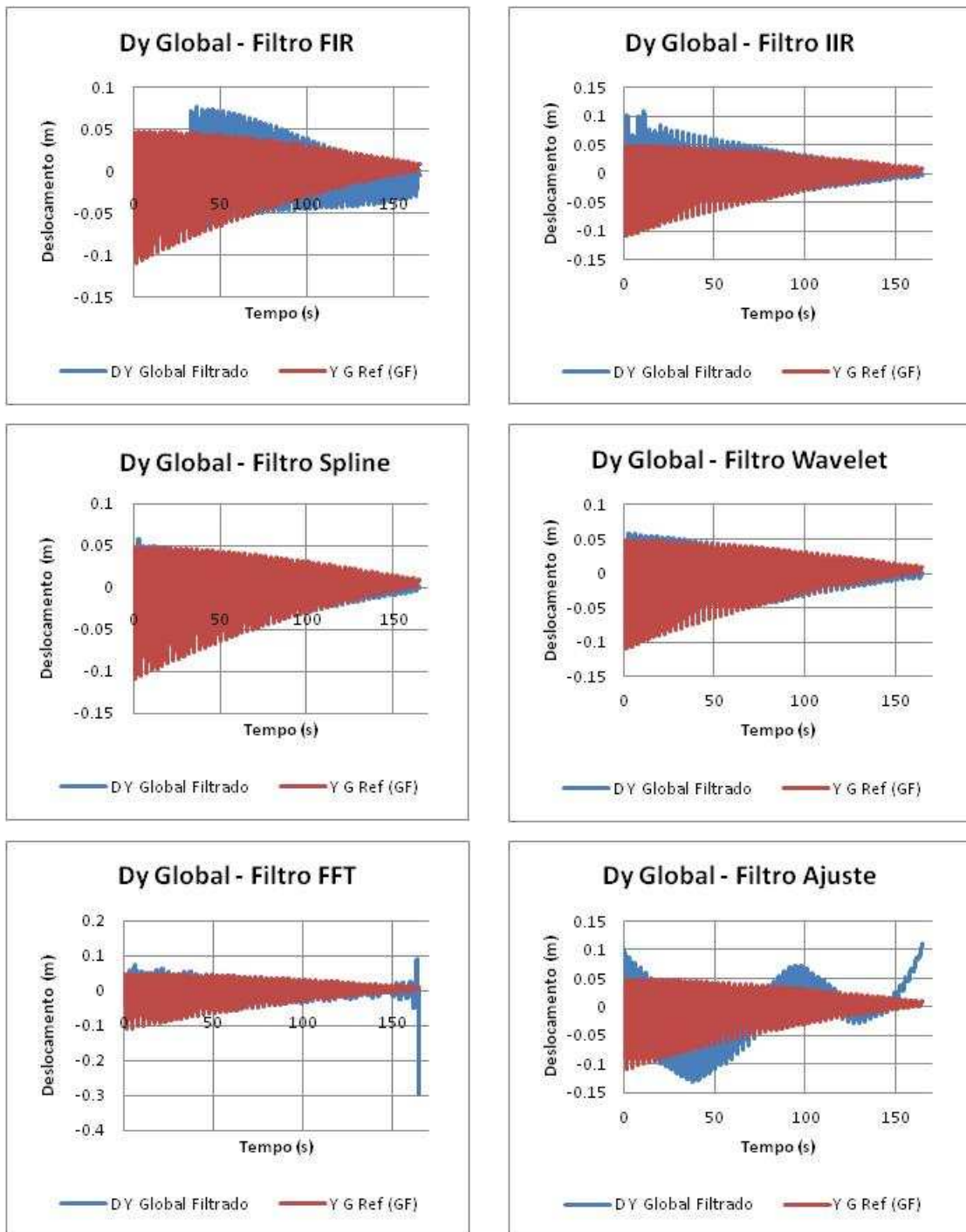


Figura 4.31– Sinais de Dy da garrafa fixa filtrado

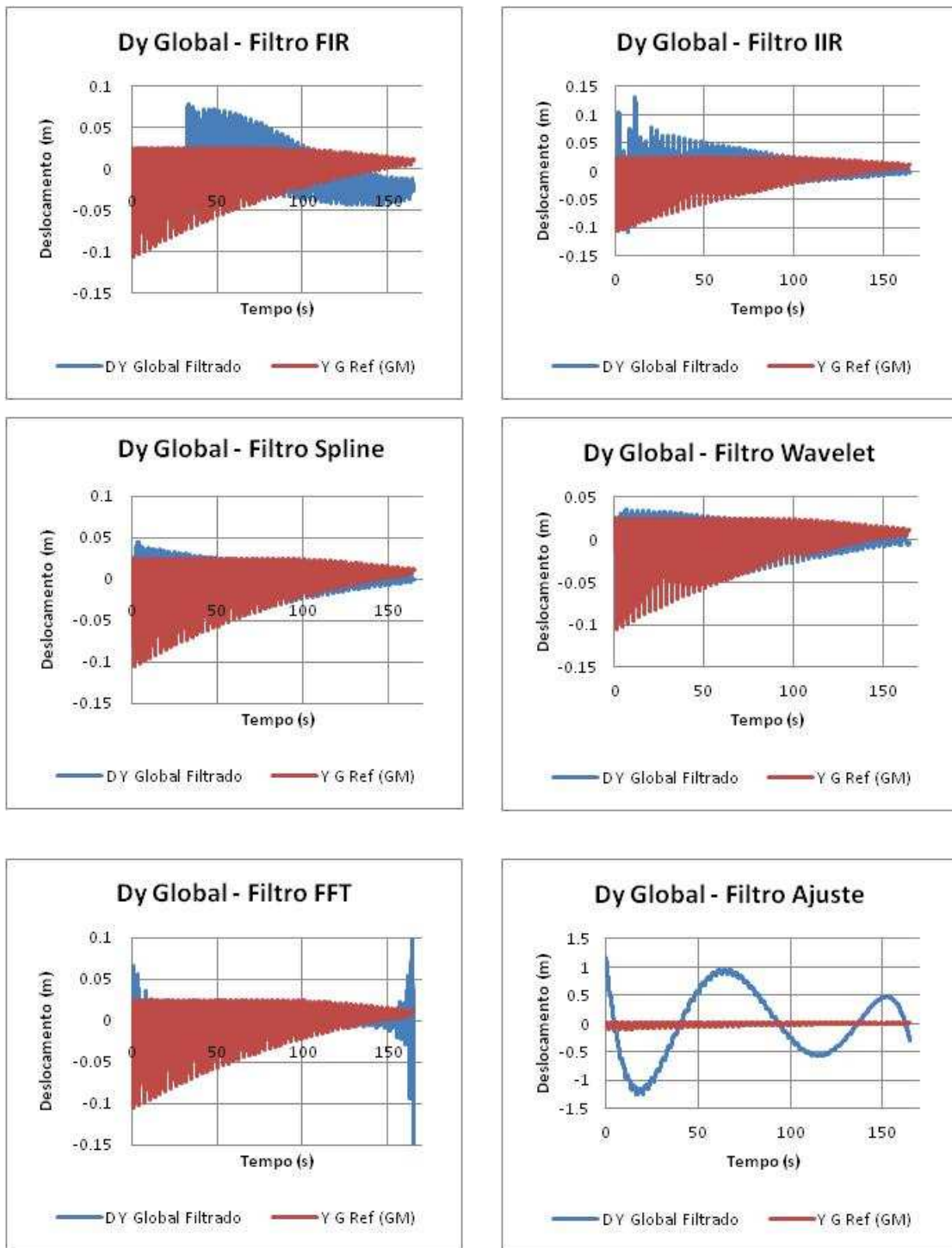


Figura 4.32– Sinais de Dy da garrafa móvel filtrado

A última etapa de comparação foi estimar os deslocamentos relativos. Para isso, os deslocamentos estimados nas direções Z e Y a partir da garrafa móvel foram projetados para o referencial do pêndulo através das Equações 4.19 e 4.20. Os parâmetros utilizados são apresentados no Anexo 2. A Figura 4.33 apresenta uma comparação entre o deslocamento de referência (Desl-Ref), o qual é medido diretamente

pelos flexímetros, e o deslocamento longitudinal da garrafa móvel com o uso dos filtros. Conforme pode se observar nesta figura, as melhores correlações foram obtidas para os filtros dos tipos *Spline* e *Wavelet*.

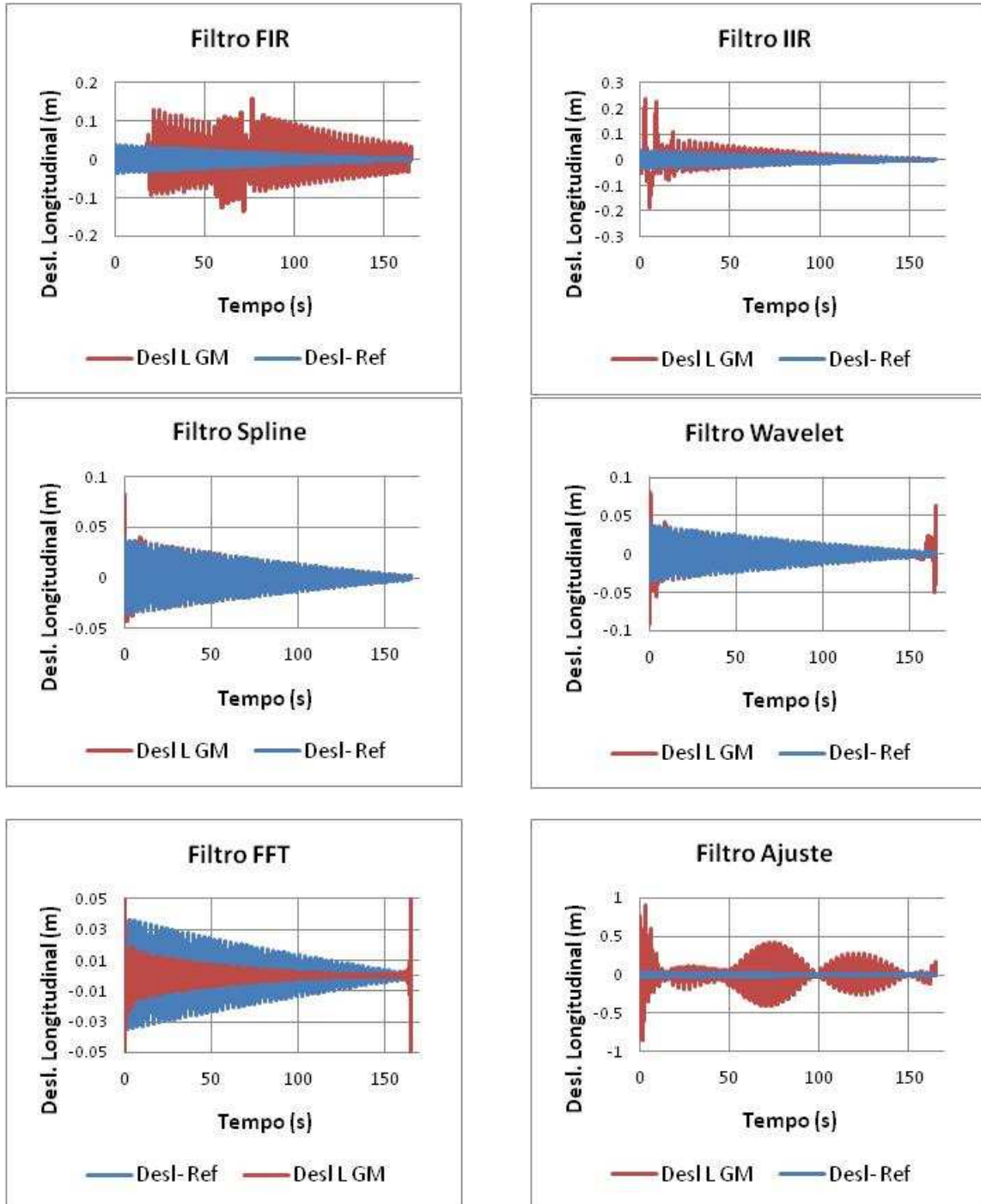


Figura 4.33 - Deslocamento Longitudinal da Garrafa Móvel filtrado e Deslocamento de Referência

As Figuras 4.34 e 4.35 apresentam, respectivamente para as garrafas fixa e móvel, o deslocamento transversal obtido após as filtragens. Teoricamente, o que se

esperava era que o sinal de deslocamento transversal, tanto da garrafa fixa como da móvel, fossem praticamente nulos. Isto ocorreu para os filtros dos tipos *Spline*, *Wavelet* e *FFT*, não ocorrendo para os demais.

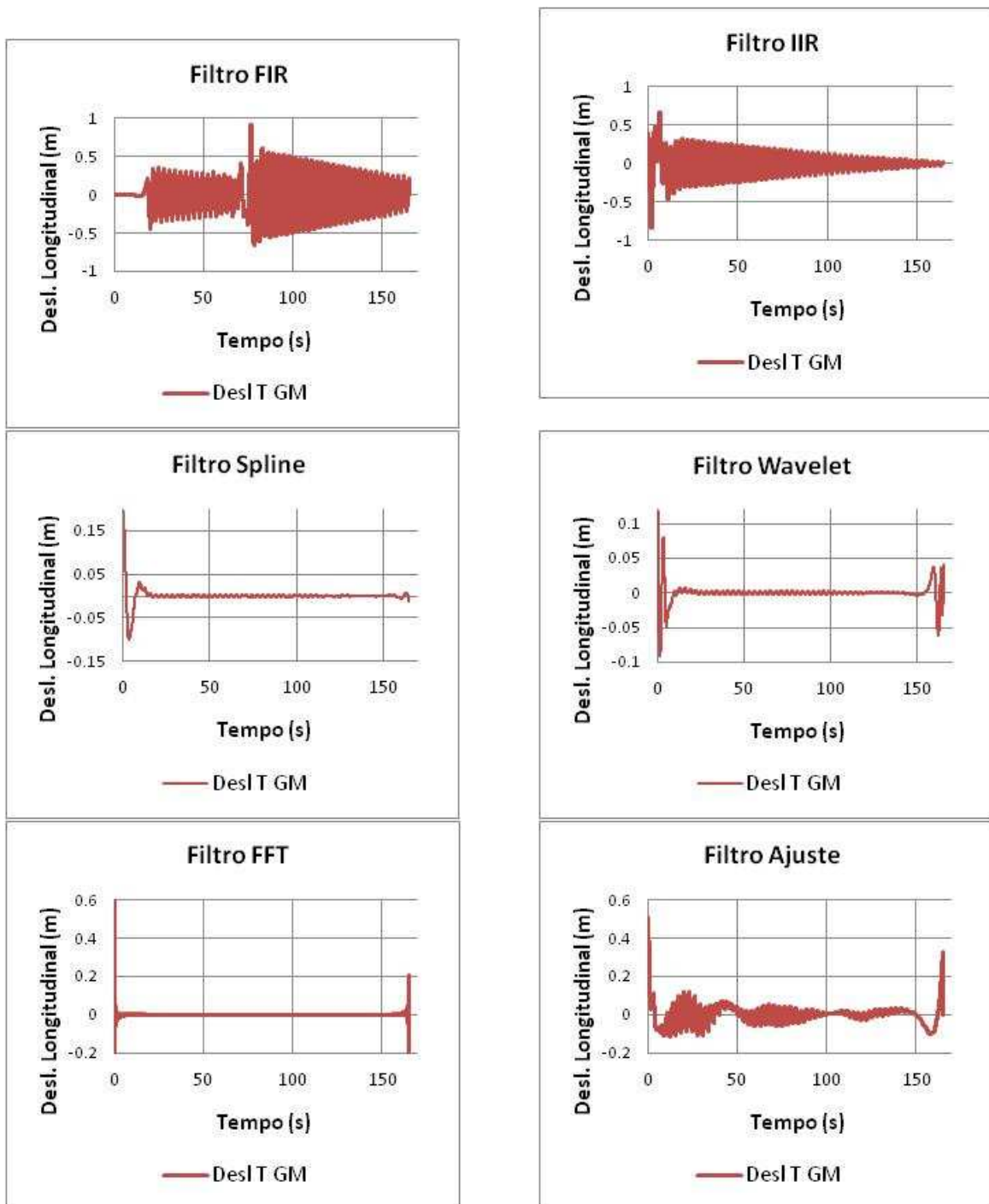


Figura 4.34 – Deslocamento Transversal da Garrafa Móvel filtrado

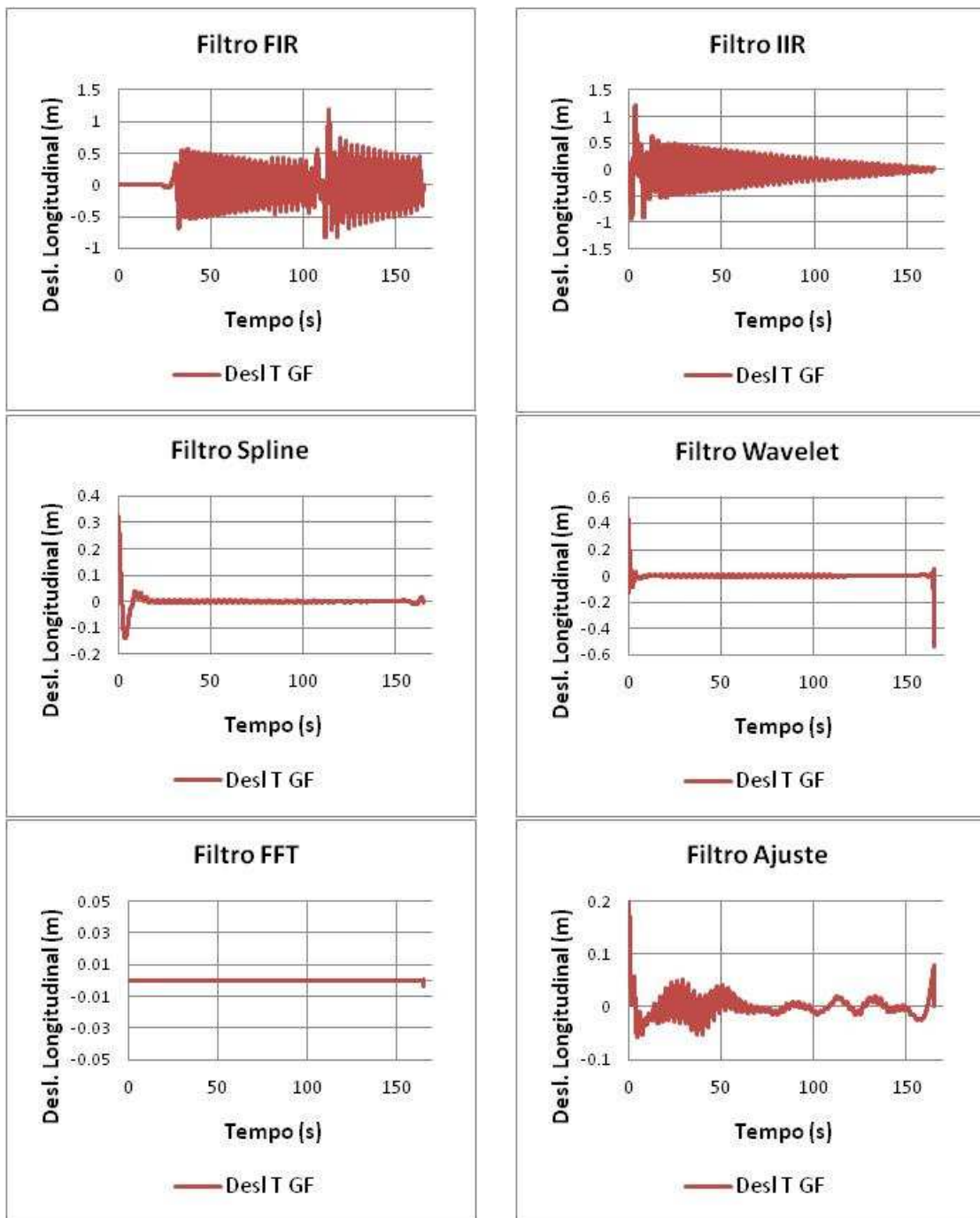


Figura 4.35 – Deslocamento Transversal da Garrafa fixa filtrada

Fazendo uma análise global dos resultados dos deslocamentos nas direções X e Y, para as garrafas fixa e móvel, observa-se que os filtros dos tipos *Wavelet*, *Spline* e *FFT* sempre apresentaram resultados bem consistentes. O filtro do tipo *IIR* mostrou correlações razoáveis, enquanto os filtros dos tipos *FIR* e *Ajuste* apresentaram resultados inconsistentes.

Analisando os deslocamentos relativos, o filtro que apresentou melhores resultados foi o do tipo *Wavelet*, seguido dos filtros *Spline* e FFT. Os demais, em geral, não apresentaram resultados consistentes.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos nas simulações numéricas e nos testes experimentais na mesa vibratória e no pêndulo, são apresentados, neste capítulo, os comentários finais e algumas recomendações de trabalhos futuros.

Dos diversos filtros analisados, os que se mostraram mais adequados para a aplicação são os dos tipos *Wavelet*, *Spline* e FFT. Estes filtros conseguiram eliminar as baixas frequências sem que afetasse substancialmente o restante do sinal. Isto pode ser comprovado tanto nas simulações numéricas, quanto nos experimentos realizados. Deve-se ressaltar, no entanto, que esses tipos de filtros não têm uma representação clara em frequência, já que conforme mostrado nos capítulos II e III, eles não dependem diretamente da frequência de corte.

A maior surpresa está associada ao fato de que os filtros dos tipos FIR e IIR, muito utilizados no processamento de sinais, apresentaram os piores resultados afetando substancialmente o sinal quando estes eram aplicados para eliminar baixas frequências, conduzindo os sinais integrados a divergirem bastante dos valores esperados, conforme mostrado nos experimentos.

Conforme era esperado, os filtros de Ajuste de função polinomial se mostram bastante eficientes quando os sinais apresentam tendências, no entanto, nas demais situações, este tipo de filtro se mostrou pouco eficaz. Este comportamento se deve ao fato de que a função é ajustada em todo o período do sinal, diferentemente do que ocorre na *Spline* que ajusta a função de trechos em trechos do sinal fazendo com que a curva possa acompanhar melhor as baixas frequências do sinal.

Propõe-se como estudos futuros, analisar sinais randômicos com baixas frequências provenientes de medições de garrafas instaladas em um *riser* e realizar a integração e filtragem desses sinais utilizando os três filtros que apresentaram os melhores resultados, i. é, *Spline*, *Wavelet* e FFT.

Outro ponto importante que pode ser avaliado futuramente é a utilização da metodologia proposta em outras aplicações para a indústria *offshore*, tais como movimentos de embarcações, lançamento de estacas torpedo, etc.

Ainda como proposta de continuidade desta pesquisa, seria importante o desenvolvimento de uma metodologia na qual fossem utilizados vários filtros em seqüência buscando uma maior acurácia na resposta final. Esta metodologia poderia

também combinar estratégias de busca para que fosse possível atingir o objetivo de uma forma mais eficiente. Cabe ressaltar que, neste trabalho, os parâmetros dos diversos filtros foram obtidos de forma empírica através de um método de tentativas e erros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Roitman N., Magluta C. , 2005, Relatório COPPETEC, *Monitoração e Processamento dos dados Coletados em Bend Stiffener*

[2] http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=557&Itemid=168 – Acesso em 26/09/2008

[3] Roitman N., Magluta C. , 2006, Relatório COPPETEC, *Análise dos Lançamentos Relativos das Estacas Torpedos da Plataforma P-50*

[4] SMITH, W., 1999, *The Scientist and engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing. Second edition.

[5] <http://www.cefala.org/~leoca/ee/filtros/filtros.pdf> - Acesso em 03/02/2010

[6] <http://calypso.inesc-id.pt/FCUL/psm/prats/Prat-7-Nov-10.pdf> - Acesso em 05/03/2010

[7] OPPENHEIM, A.V., Schafer, R., 1999, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall

[8] http://www.dsp.efn.unc.edu.ar/documentos/Filtro_FIR.pdf - Acesso em 25/05/2009

[9] CHACON, J. A. R., 2002, *Diseño de Filtros Digitales FIR de fase lineal usando Muestras Espaciadas de Acuerdo con las Posiciones de los ceros de Polinomio Ortogonales En El Domínio de la Frecuencia*- Universidad Costa Rica, San José, Costa Rica

[10] GARCIA, L. J. 2000, *Procesamiento de Señales*, P 183-299

[11] <http://www.faqs.org/docs/sp/> - Acesso em 25/04/2011

[12] <http://www.pgea.unb.br/~joaoluiz/pdf/adson-psb-capitulo.pdf> - Acesso em 24/02/2011

- [13] BARBARINI, L. H. M., 2007, *Síntese de Cascos de Embarcações através de Métodos de Otimização Aplicados a Curva B-Spline*, Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- [14] SHUMAKER, Larry L. 1980, *Spline Functions: Basic Theory*, 3ª Edição
- [15] GREEN, P., J., and B.W.Silverman, 1994, *Nonparametric Regression and Generalized Linear Models*. . London
- [16] <http://www.tenorio.unir.br/cn/seminarios/SPLINE.pdf> - Acesso em 01/12/2008
- [17] BOOR, Carl , 1978, *Practical Guide To Spline*, Revised Edition
- [18] SILVA, L. K. M., 2000, *Sistema de Modelagem Geométrica Usando Splines*. Universidade Católica de Pernambuco , Pernambuco, Brasil.
- [19] SANTOS, R. M. L., 2004, *Segmentação da Fala Utilizando as Transformadas Wavelets Discretas*. Monografia., Universidade Luterana do Brasil, Canoas, RS, Brasil
- [20] <G:\1\Transformada-Wavelet-Discreta.htm> – Acesso em 14/01/2011
- [21] LabView v8.6 – *Wavelet Analysis Tools User Manual*
- [22] BUCHER, M. F., 2001, *Metodologias para Aplicação de Técnicas Tempo-Frequência em Dinâmica Estrutural e ao Método de Contorno*. Tese de D.sc, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- [23] COX, P. H, 2004, *Análise e Síntese de um Processador Digital Wavelet*, Tese de Doutorado da Universidade Paulista, Ilha Solteira, São Paulo.

[24]CARIA,E. C. S. , 2009, *Análise de Processamento de Imagens Radiográficas por Métodos baseados no Background Subtraction Method e no emprego da Transformada Wavelet*. Dissertação de M. Sc. Programa de Eng. Metalúrgica e Materiais, COPPE/ UFRJ.

[25]SALIM, R. H.,2006, *Detecção de Faltas em Sistemas de Distribuição Utilizando a Transformada Wavelet*. Monografia . Departamento de Engenharia Elétrica.Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,Brasil

[26] file:///F:/FFT-Transformada-Rapida-de-Fourier.htm - Acesso em 03/04/2010

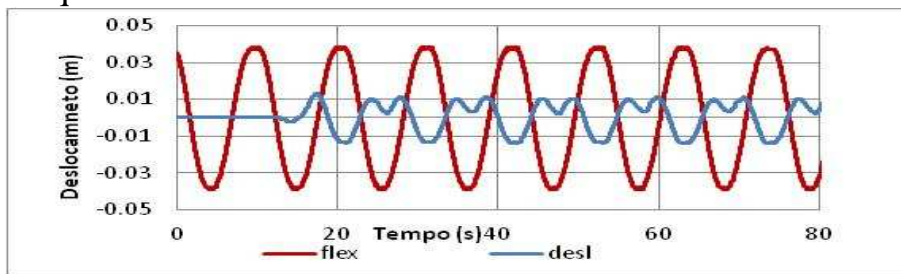
[27] JONES. D. L., 2008, *The DFT, FFT, and Practical Spectral Analysis*. Rice University, Houston, Texas. EUA

[28] COOLEY,J.W., 1965, *An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series*, Mathematics of Computation,

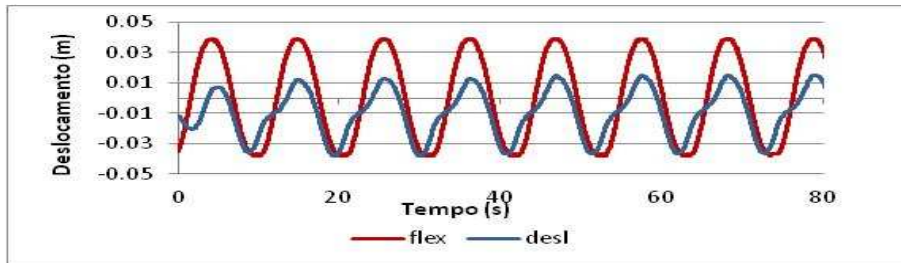
[29] http://pessoal.utfpr.edu.br/janeczko/index_files/pds/capitulo4_3.pdf

ANEXO 1: COMPARAÇÃO ENTRE OS DESLOCAMENTOS OBTIDOS COM O FLEXÍMETRO E ATRAVÉS DA DUPLA INTEGRAÇÃO DO ACELERÔMETRO UTILIZANDO-SE OS FILTROS APRESENTADOS

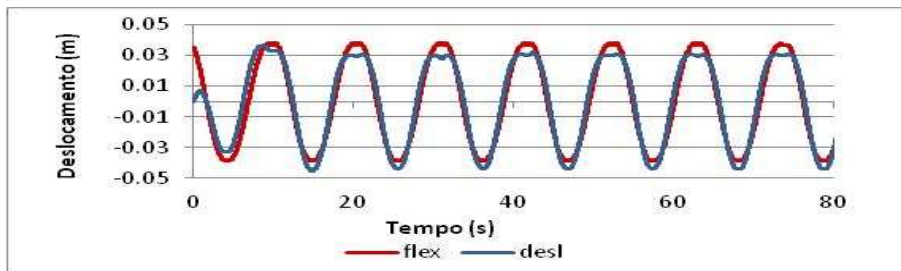
Frequência 0.1 Hz - Sinal Harmônico



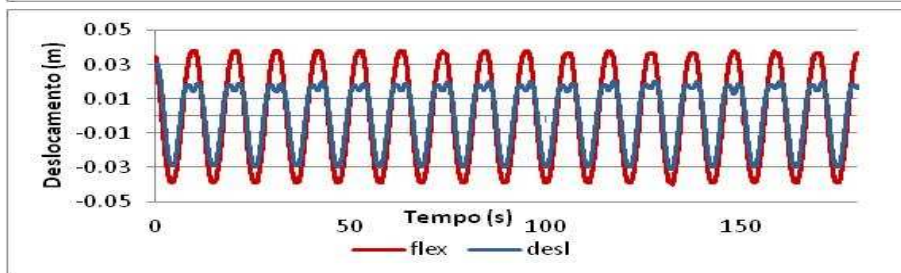
FIR



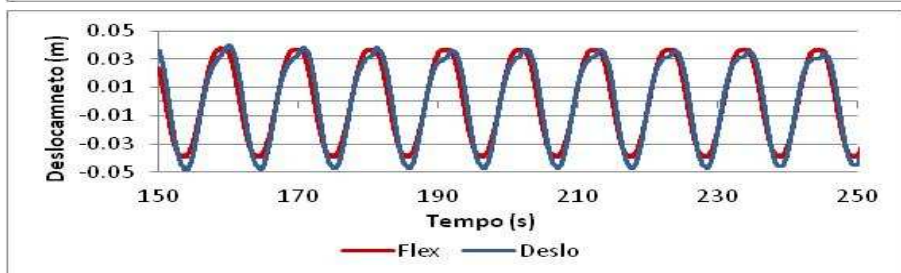
IIR



Spline

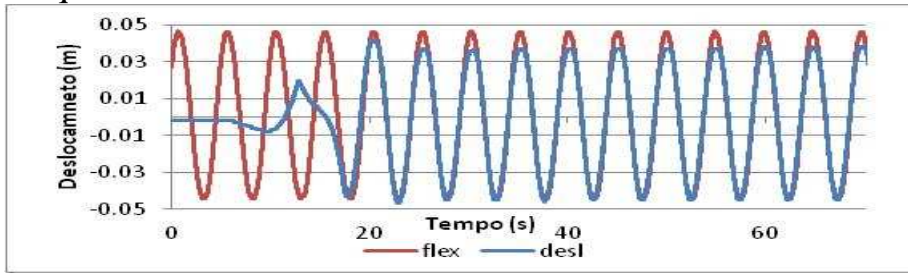


Wavelet

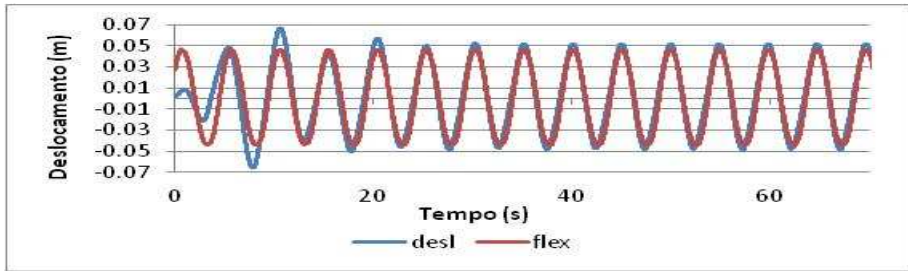


FFT

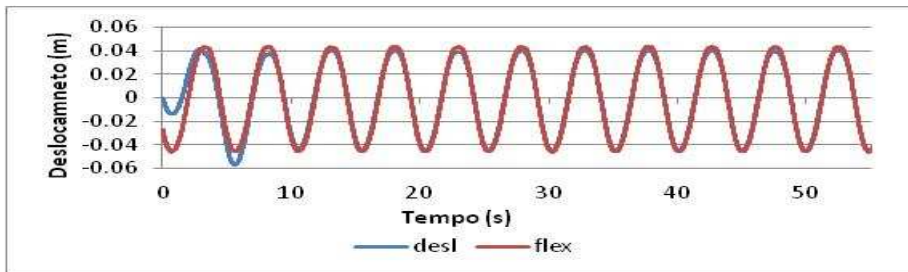
Frequência 0.2 Hz - Sinal Harmônico



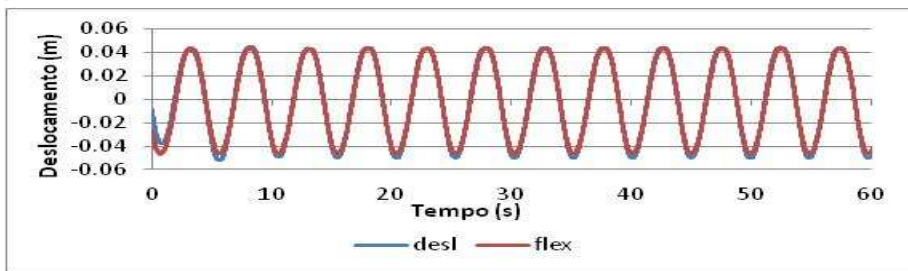
FIR



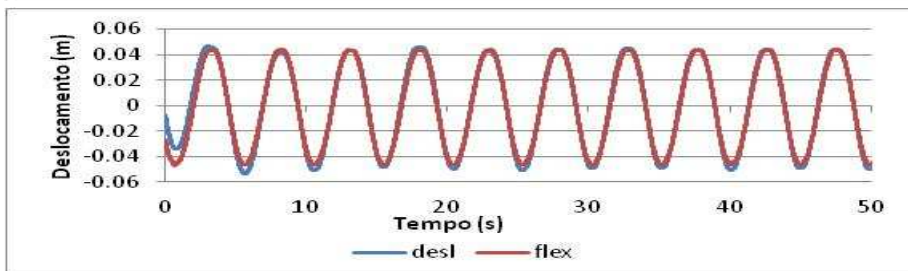
IIR



Spline

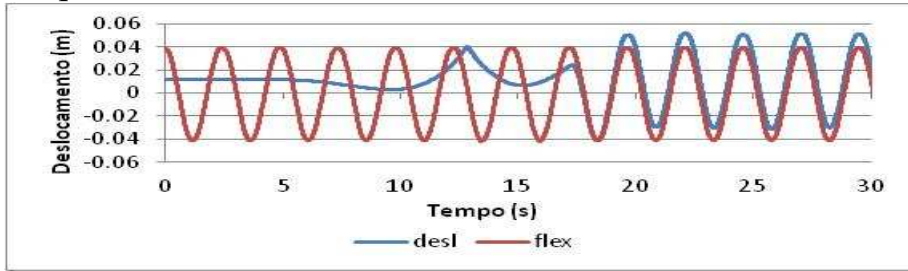


Wavelet

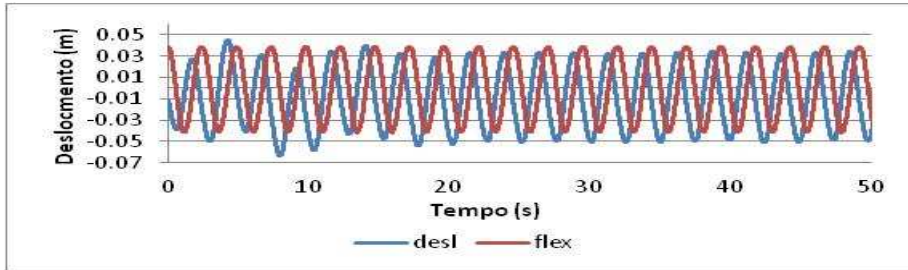


FFT

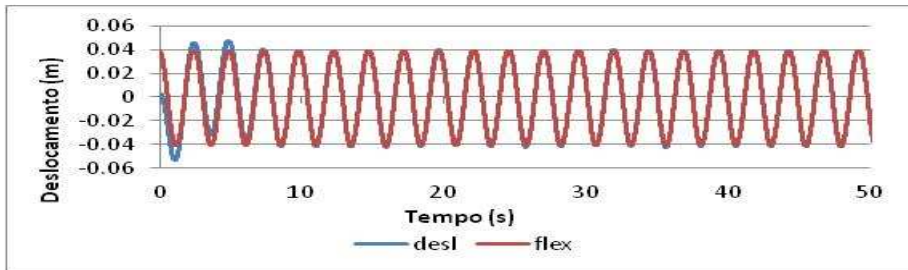
Frequência 0.4 Hz - Sinal Harmônico



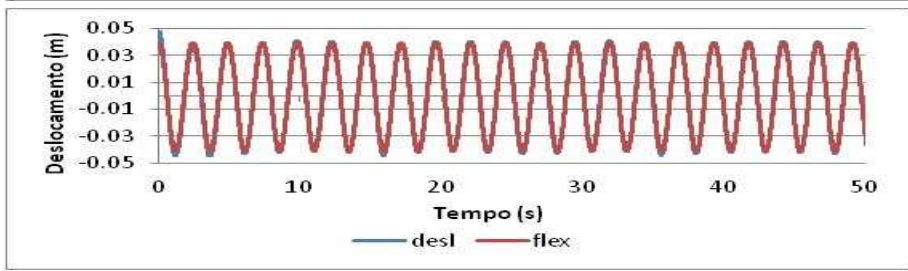
FIR



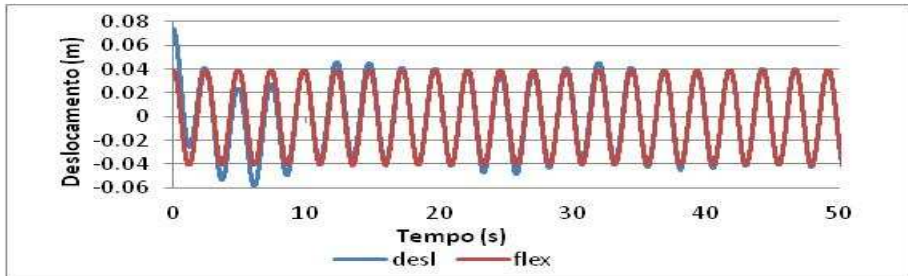
IIR



Spline

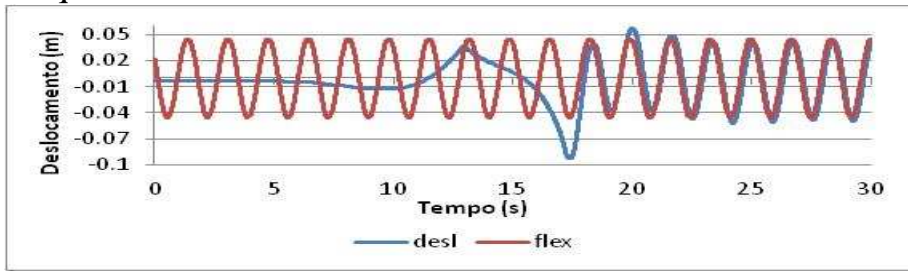


Wavelet

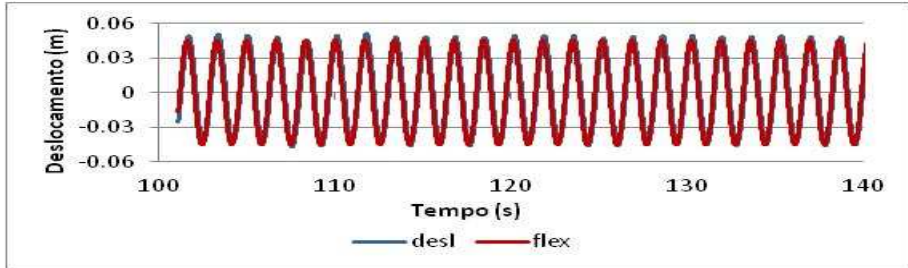


FFT

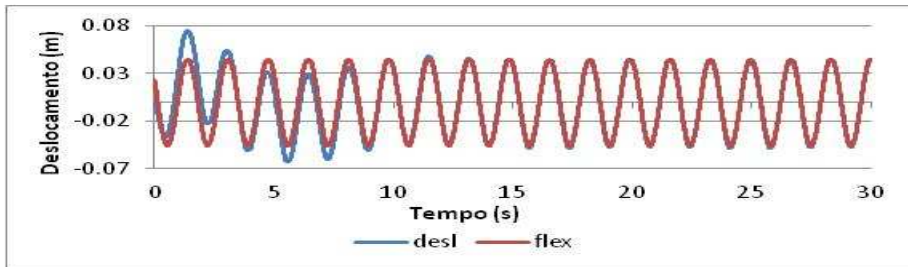
Frequência 0.6 Hz - Sinal Harmônico



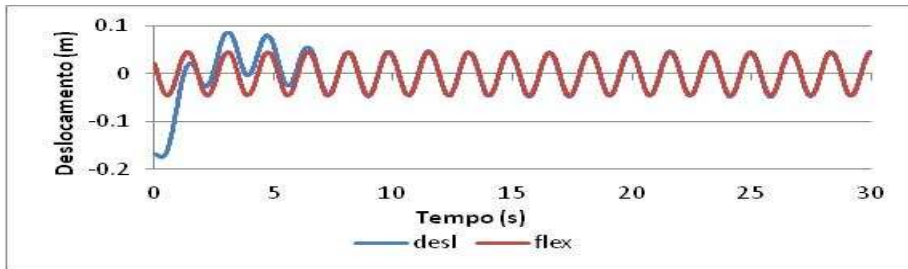
FIR



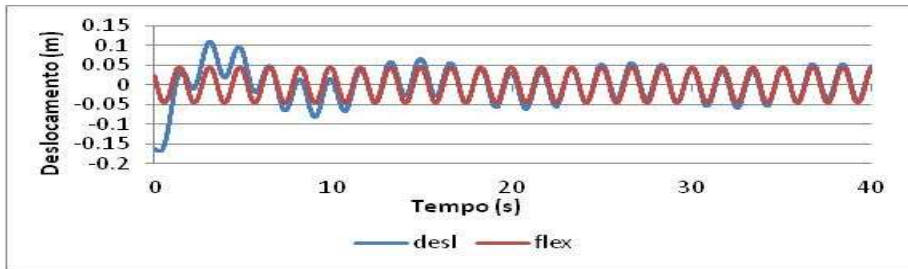
IIR



Spline

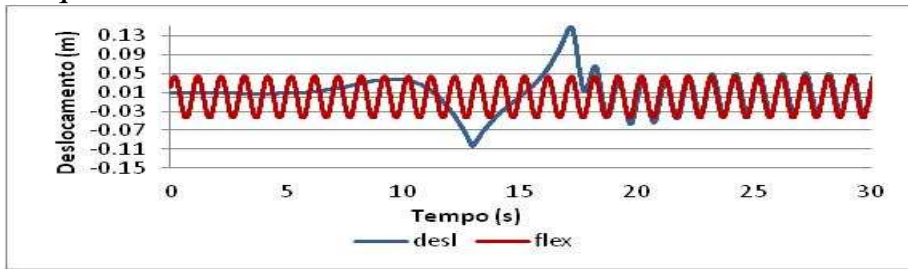


Wavelet

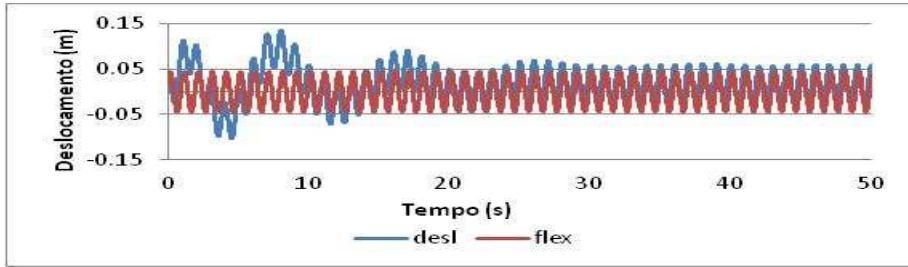


FFT

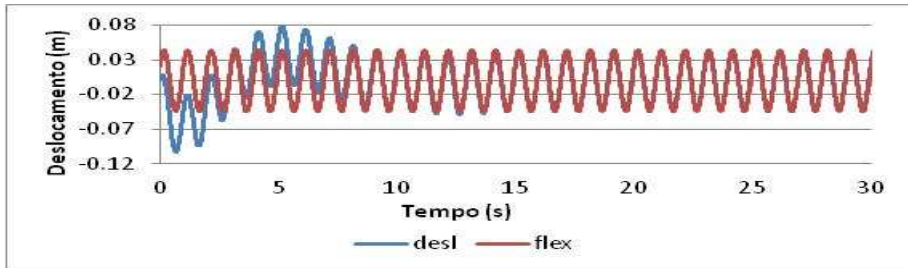
Frequência 1.0 Hz - Sinal Harmônico



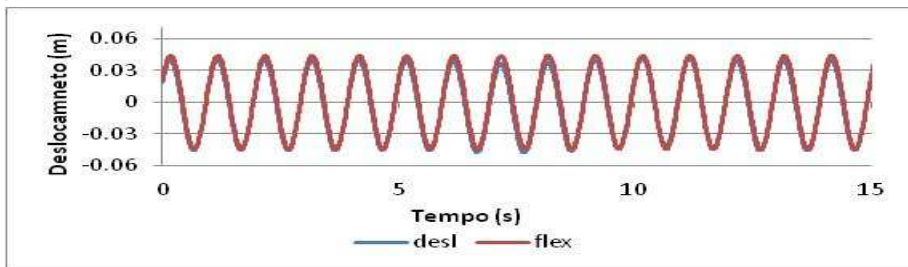
FIR



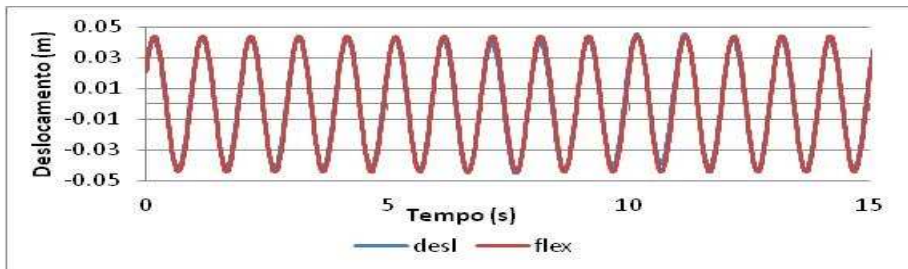
IIR



Spline

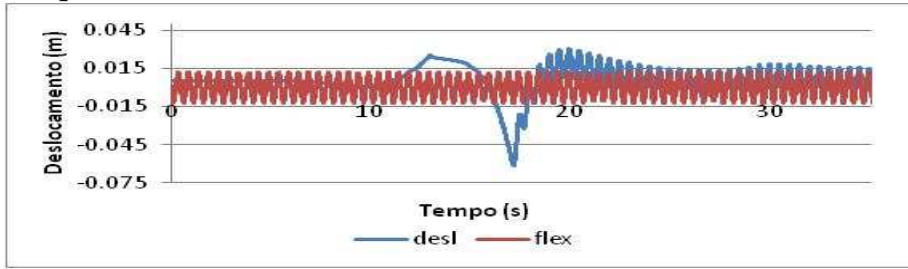


Wavelet

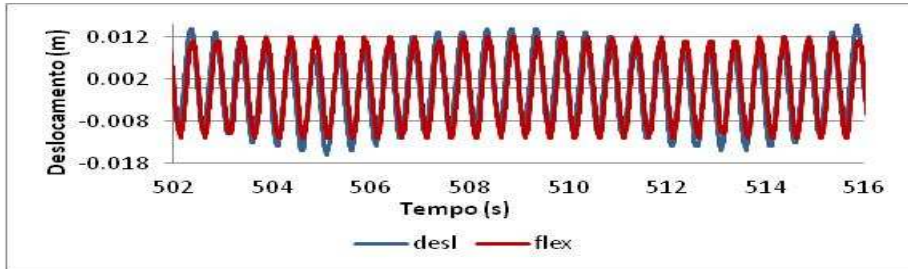


FFT

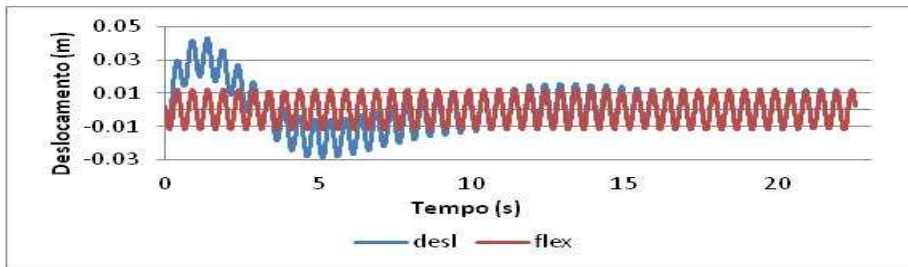
Frequência 2.0 Hz - Sinal Harmônico



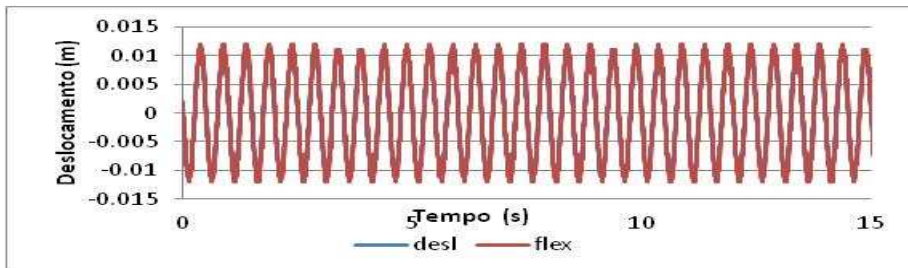
FIR



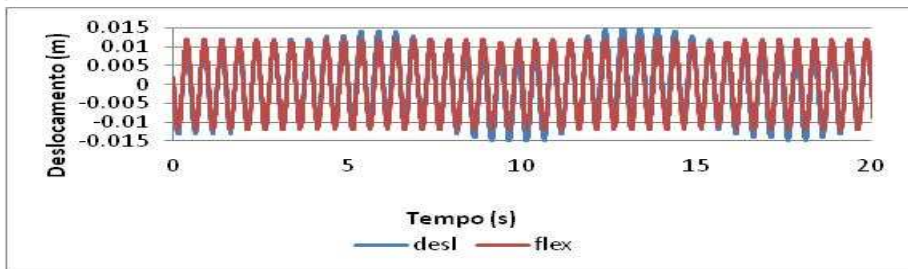
IIR



Spline

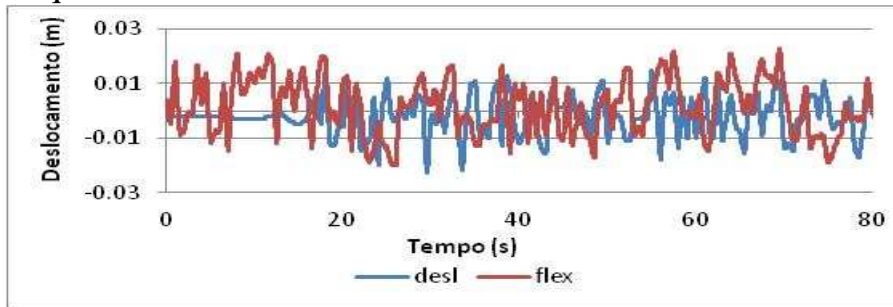


Wavelet

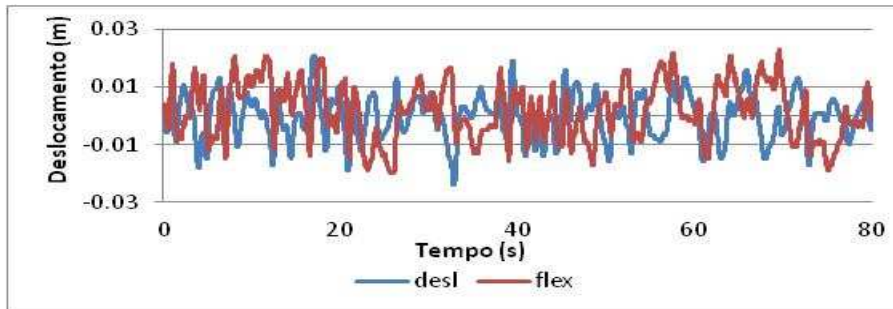


FFT

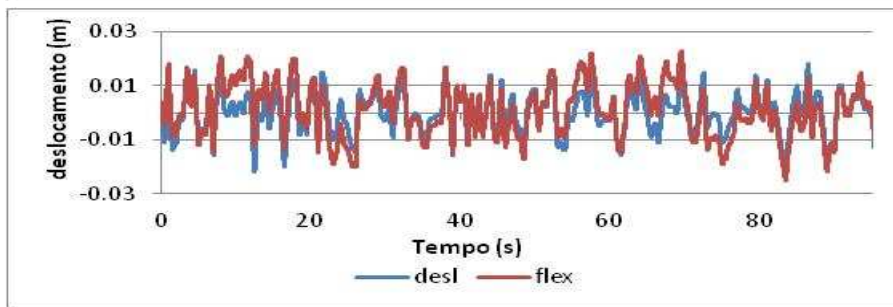
Frequência 0-0.5 Hz - Sinal Randômico



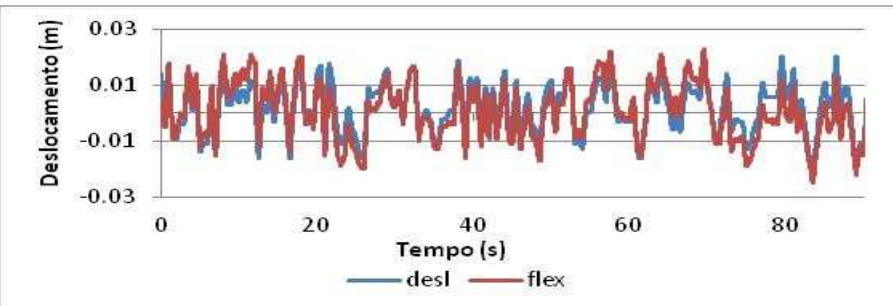
FIR



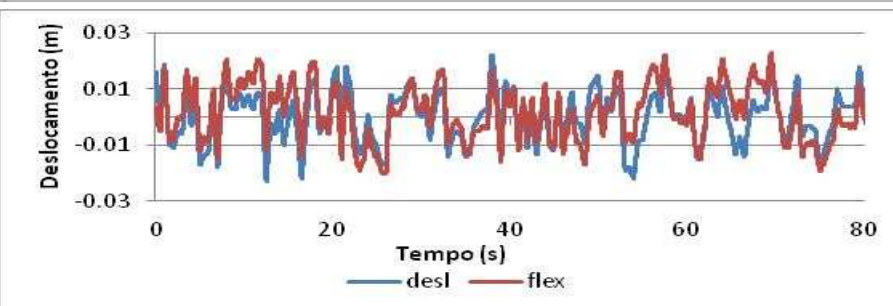
IIR



Spline

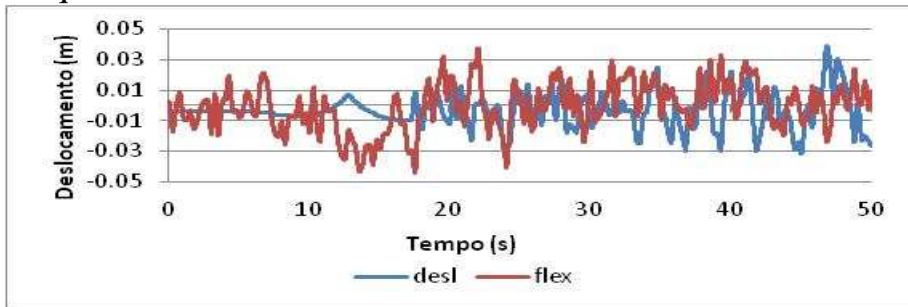


Wavelet

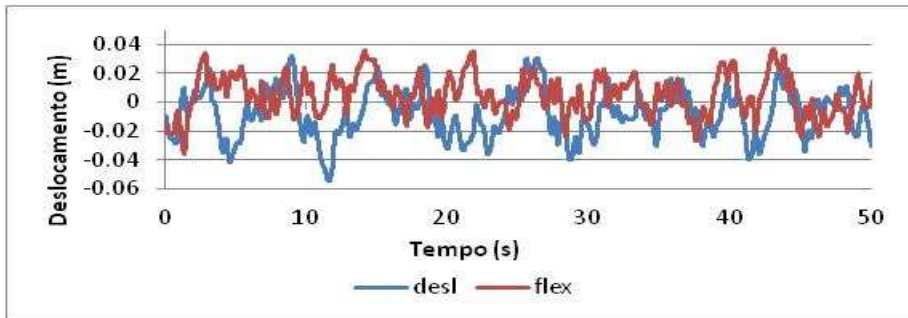


FFT

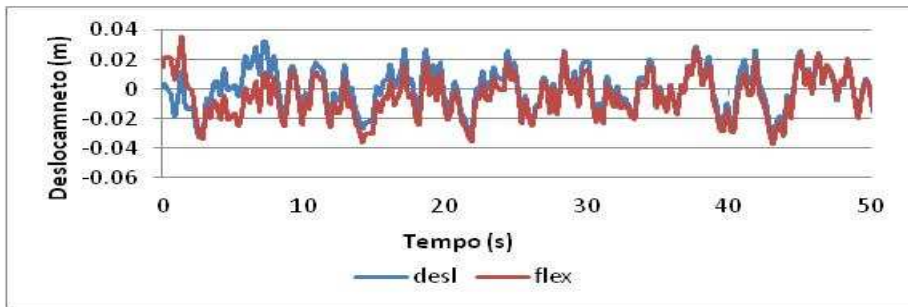
Frequência 0-1.0 Hz - Sinal Randômico



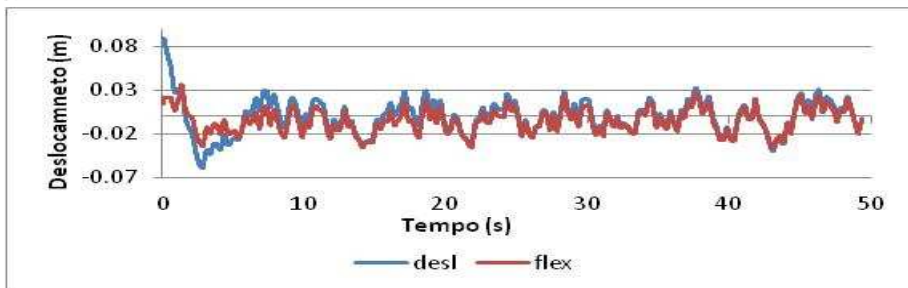
FIR



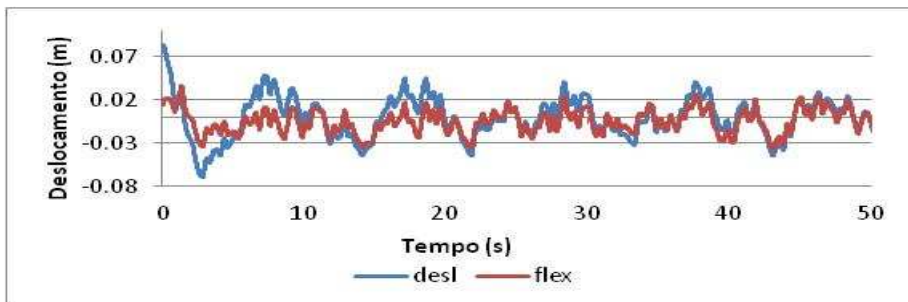
IIR



Spline

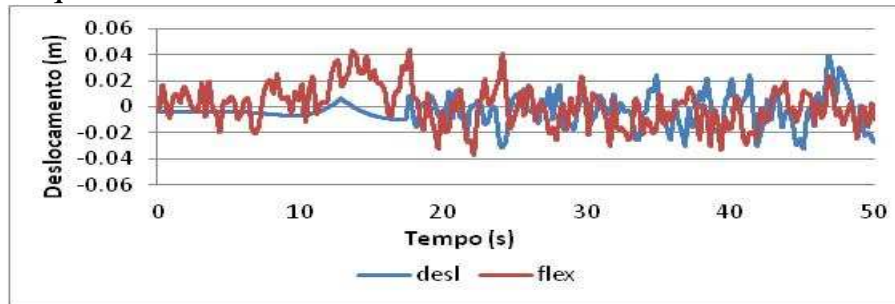


Wavelet

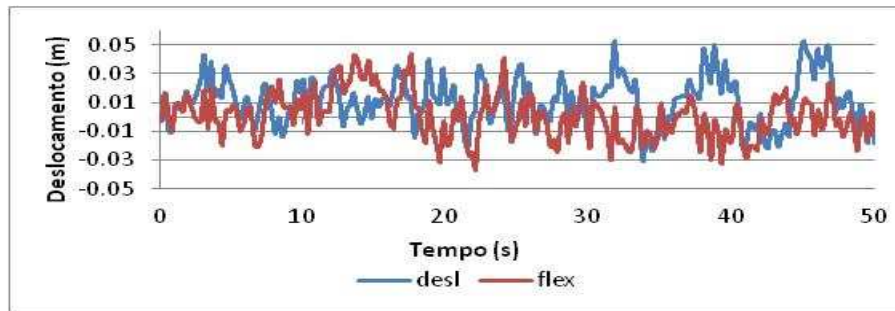


FFT

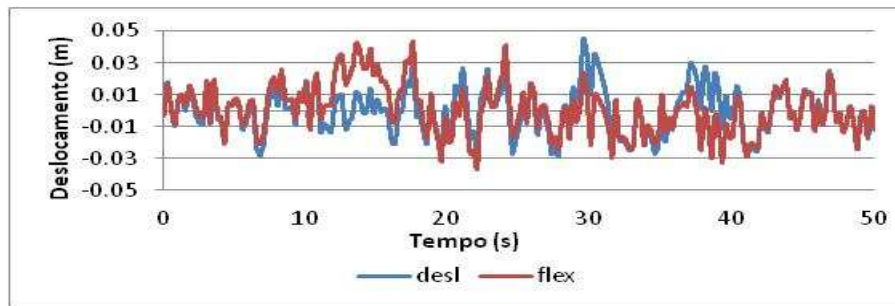
Frequência 0-1.5 Hz- Sinal Randômico



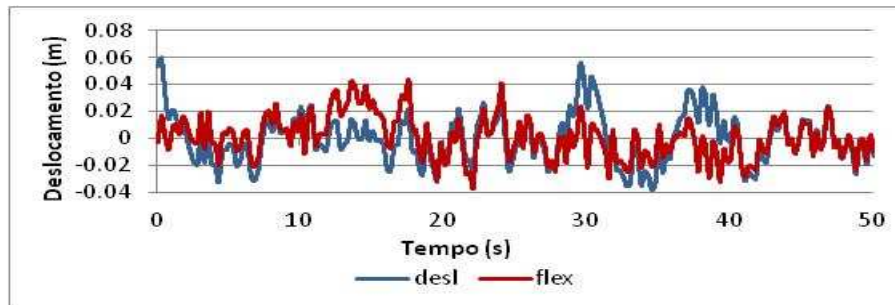
FIR



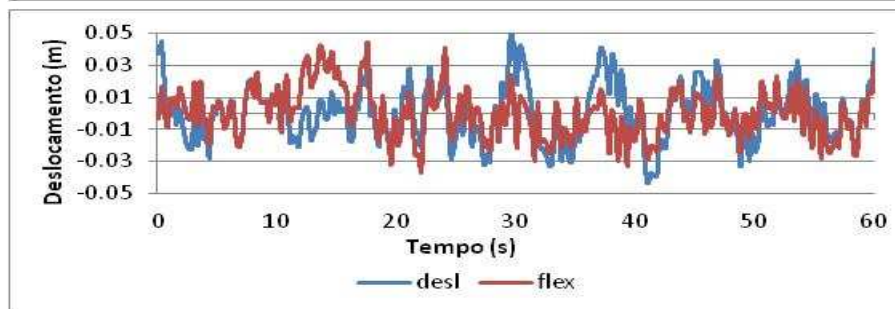
IIR



Spline

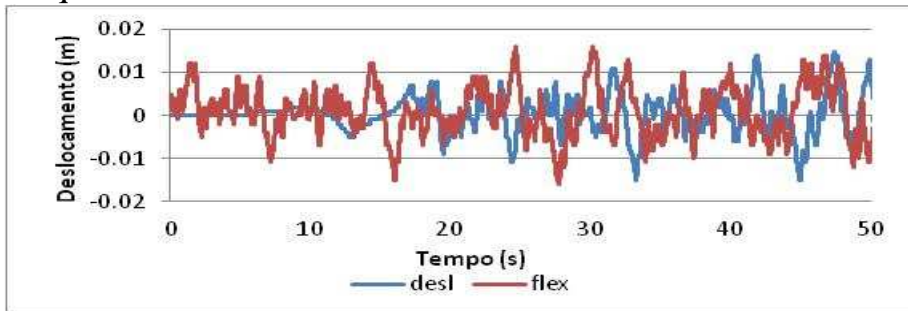


Wavelet

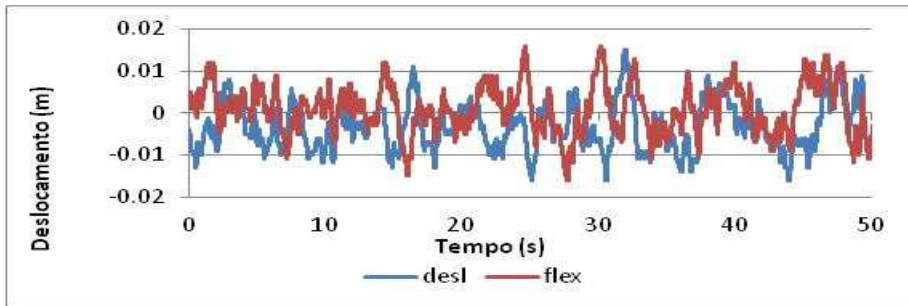


FFT

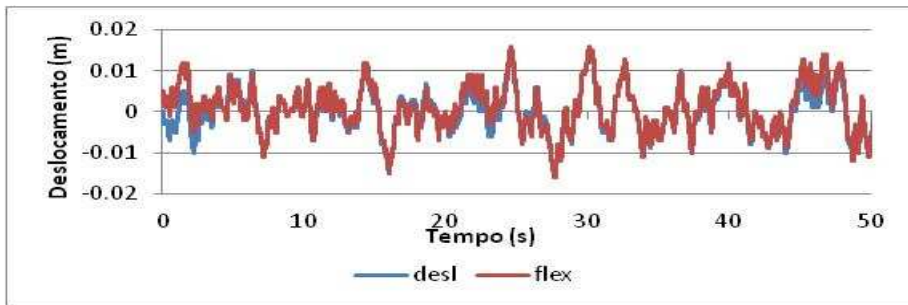
Frequência 0-2.0 Hz- Sinal Randômico



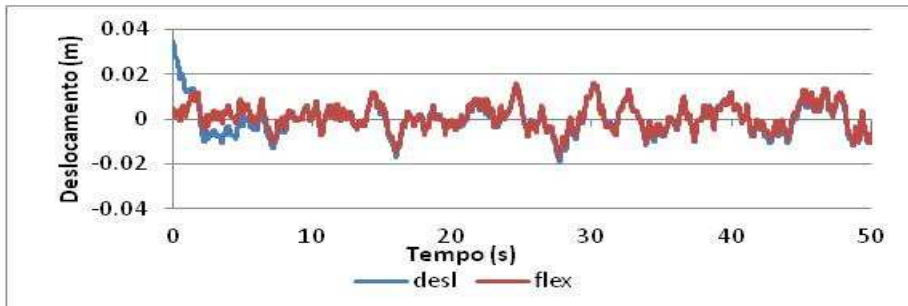
FIR



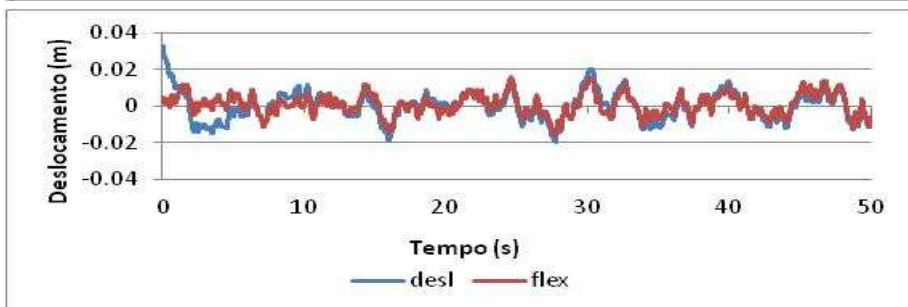
IIR



Spline



Wavelet



FFT

ANEXO 2: PARÂMETROS DOS FILTROS PARA OBTENÇÃO DO DESLOCAMENTO GLOBAL E DESLOCAMENTO RELATIVO DAS GARRAFAS FIXA E MÓVEL

Garrafa móvel

Deslocamento Longitudinal Garrafa Móvel

	FIR		IIR		SPLINE	WAVELET		FFT	AJUSTE
	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	p	nível	Wavelet	p	grau polinômio
Aceleração	2501	0.1	1	0.1	1000	7	Haar	10	3
Velocidade	2501	0.1	1	0.1	10000	7	Haar	10	4
Deslocamento	2501	0.1	1	0.1	1000	7	Haar	1000	4
Ângulo	2501	0.1	1	0.1	100	7	Haar	10000	4

Garrafa fixa

Deslocamento Longitudinal Garrafa Fixa									
	FIR		IIR		SPLINE	WAVELET		FFT	AJUSTE
	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	p	nível	Wavelet	p	grau polinômio
Aceleração	2501	0.1	2	0.1	100	7	Haar	10	2
Velocidade	1501	0.1	1	0.1	1000	7	Haar	10	3
Deslocamento	2501	0.1	2	0.1	10000	7	Haar	1000	4
Ângulo	2501	0.1	2	0.1	1000	7	Haar	10000	3

Deslocamento Transversal Garrafa Móvel

	FIR		IIR		SPLINE	WAVELET		FFT	AJUSTE
	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	p	nível	Wavelet	p	grau polinômio
Aceleração	1501	0.1	2	0.1	1000	7	Haar	10	4
Velocidade	1501	0.1	2	0.1	10000	7	Haar	10	3
Deslocamento	1501	0.1	2	0.1	1000	7	Haar	1000	4
Ângulo	1501	0.1	2	0.1	10	7	Haar	1000	4

Deslocamento Longitudinal Garrafa Móvel

	FIR		IIR		SPLINE	WAVELET		FFT	AJUSTE
	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	p	nível	Wavelet	p	grau polinômio
Aceleração	701	0.1	2	0.1	1000	7	db 02	100	1
Velocidade	501	0.1	2	0.1	100	7	db 02	100	1
Deslocamento	1501	0.1	1	0.1	400	7	db 02	100	1
Ângulo	1501	0.1	5	0.1	4000000	7	db 02	1000	1

Deslocamento Transversal Garrafa Fixa

	FIR		IIR		SPLINE	WAVELET		FFT	AJUSTE
	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	coeficientes	Freq. Corte (Hz)	p	nível	Wavelet	p	grau polinômio
Aceleração	2501	0.1	1	0.1	1000	7	Haar	10	3
Velocidade	2501	0.1	1	0.1	10000	7	Haar	10	4
Deslocamento	2501	0.1	1	0.1	1000	7	Haar	1000	4
Ângulo	2501	0.1	1	0.1	100	7	Haar	10000	4