

Formulário de Relatório de IC/IT e Sumário Técnico

Programa de Bolsa de Iniciação Científica (PIC) e Tecnológica (PIBITI)
USP - Escola Politécnica/Comissão de Pesquisa

Bolsista: Marlon Dyo Fukuda Koga Curso: Engenharia Mecânica
Orientador: Roberto Spinola Barbosa Depto: Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP
Título do Projeto: Análise de sinais aplicados à identificação modal de sistemas veiculares
Modalidade da Bolsa PIC: () PIBIC () PIBITI (X) RUSP () Santander
Relatório: () Parcial (X) Final

1- INTRODUÇÃO:

Os avanços tecnológicos relacionados aos circuitos integrados causaram um imenso impacto nas áreas de atuação humana. Estes se popularizaram mundialmente e estão presentes, hoje, em praticamente todos os equipamentos eletrônicos. Isto contribuiu para que a armazenagem, análise e transmissão de sinais tomassem os papéis centrais na era da informação.

A análise de sinais se consiste em um conjunto de ferramentas matemáticas que permitem realizar transformações e extrair dados de uma variável em questão. Tais ferramentas também servem o propósito de introduzir diferentes perspectivas sobre a variação do parâmetro em questão, garantindo uma grande capacidade de medição e avaliação, que levam, por sua vez, a um entendimento mais rápido e preciso do sistema.

As áreas aplicação da análise de sinais são diversas, vão desde telecomunicação até medicina. Atualmente as técnicas e fundamentos do processamento de sinais são de importância fundamental não só para a engenharia, mas também outras áreas como de biologia, economia e saúde. Muitos avanços tecnológicos e científicos só foram possíveis graças a tais técnicas. Alguns exemplos da vasta quantidade de aplicações são processamento de imagem e áudio, obtenção sinais biomédicos, compressão de dados até proteção de sistemas de potência.

A aplicação de interesse para esta proposta é a identificação modal. Esta é uma tecnologia voltada para a determinação e melhoria das características dinâmicas de estruturas de engenharia, em especial, veículos. Com a identificação dos dados modais é possível inferir os parâmetros do sistema, compreender suas propriedades, prever as resposta à excitação e localizar e corrigir problemas estruturais.

2- OBJETIVOS:

O objetivo do trabalho é realizar a identificação modal de um sistema veicular. A primeira análise a ser feita é via teoria, via construção de um modelo matemático do sistema, e, em seguida, experimentalmente, por meio de levantamento de dados, tratamento e análise de dados.

3- METODOLOGIA:

Para alcançar o objetivo foram adotadas as seguintes etapas:

- Estudo da teoria

Vide referências bibliográficas.

- Modelagem de um sistema veicular:

Adotou-se o modelo físico de $\frac{1}{2}$ de veículo para o estudo de *pitch* e *bounce*, composto por três corpos – dois não suspensos, que representam essencialmente as rodas, e um suspenso, que representa o resto do veículo. De acordo com a figura:

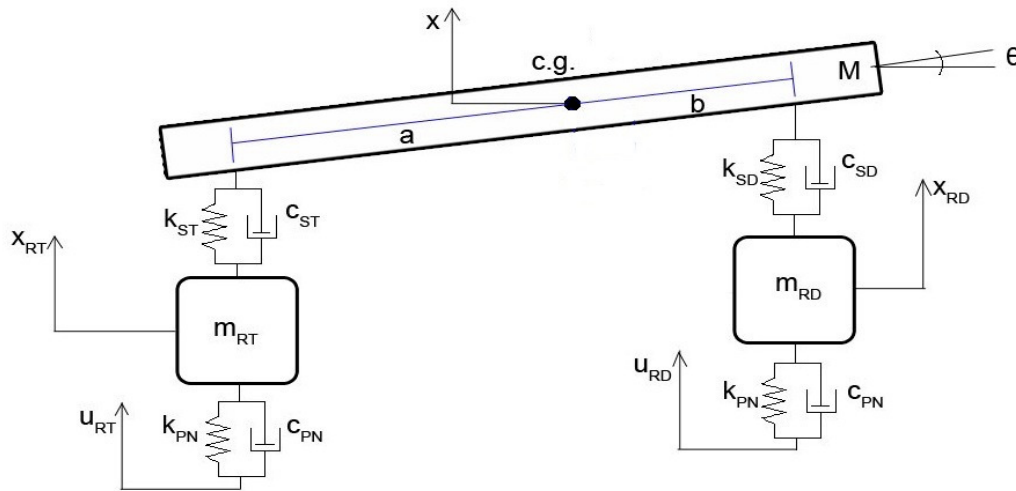


Figura 3.1- Modelo $\frac{1}{2}$ de veículo.

O equacionamento foi feito a partir formalismo de Lagrange e a linearização pela hipótese de ângulo de *pitch* pequeno. Posteriormente reescreveram-se as equações na forma matricial e na notação de espaço de estados. As equações podem ser encontradas no apêndice A.

- Análise do modelo teórico

Para analisar as características do modelo matemático obtido, tomaram-se valores numéricos para as massas, momento de inércia, constantes de mola e de amortecedor. A partir disto, levantaram-se as frequências naturais, fator de amortecimento e modos de vibração do veículo resolvendo o problema de autovalor e autovetor associado.

- Obtenção de dados experimentais

Obtiveram-se os dados experimentais por meio da realização de um determinado trajeto com um veículo modelo *Corolla* instrumentado com uma unidade inercial móvel (IMU) com frequência de amostragem de 256Hz.

- Tratamento e análise dos dados experimentais

O tratamento e análise dos diversos dados foram feitas por duas rotas.

A primeira rota para tratamento e análise dos dados tem como etapas a realização da decimação do sinal, o separação do sinal em trechos de tamanho estipulado com sobreposição, remoção da parcela linear dos trechos, multiplicação dos trechos pela janela de Hamming, aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT) em cada trecho e, finalmente, realização da média aritmética dos espectros de frequência, conforme o fluxograma a seguir:

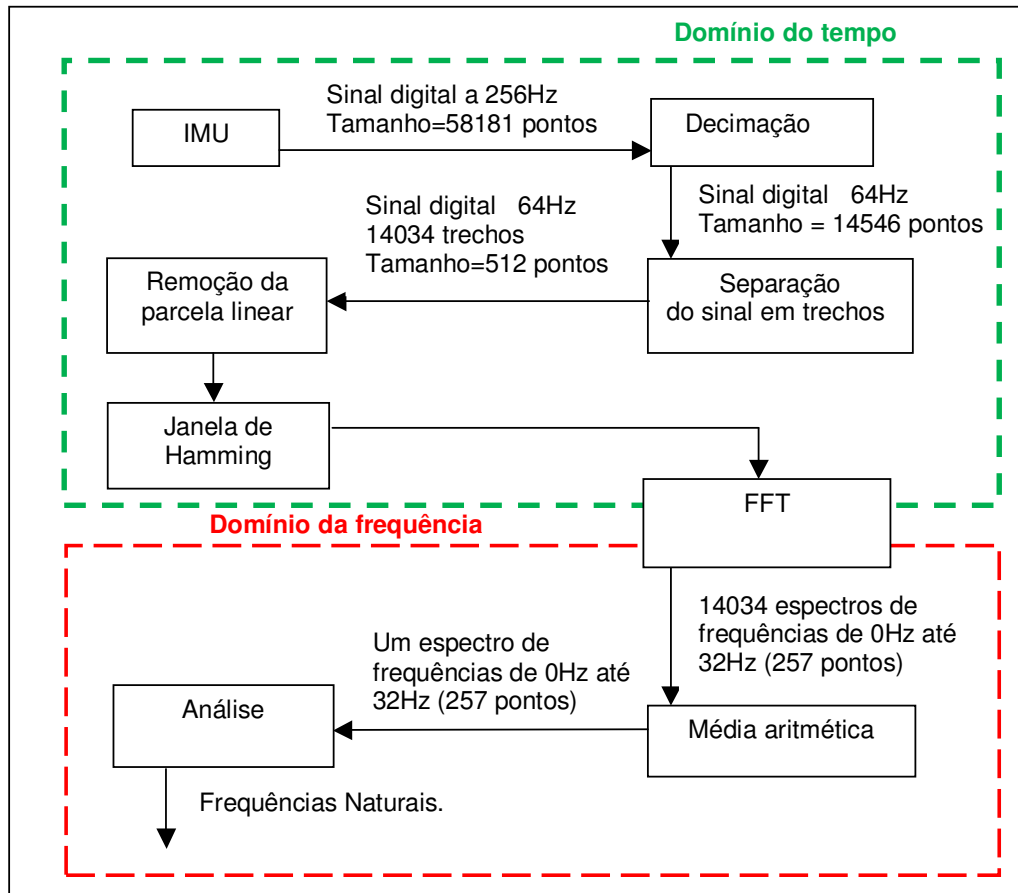


Figura 3.2 – Fluxograma da primeira rota de tratamento e análise dos dados

De modo heurístico, a decimação tem como função reduzir a frequência de amostragem para uma faixa condizente com a frequência esperada do sistema, a remoção da parcela linear elimina as informações não relevantes para a análise modal, o janelamento pela função de Hamming busca reduzir o efeito de *leakege* e o particionamento do sinal, juntamente com tomada da média do espectro, tem como objetivo reduzir o nível de ruído.

A partir do espectro de frequência resultante é feita uma análise visual para o levantamento das frequências naturais do sistema, que devem aparecer como máximos locais.

Já a segunda rota tem como etapas a decimação do sinal, a aplicação do método de decremento randômico e a análise das *Randomdec Signatures* obtida. Esta análise pode ser feita de vários meios. Neste trabalho adotou-se a aplicação da FFT e, alternativamente, a reconstrução da matriz do sistema em Espaço de Estados (E.E.) e a resolução do problema de autovalor/autovetor associado, conforme o fluxograma a seguir:

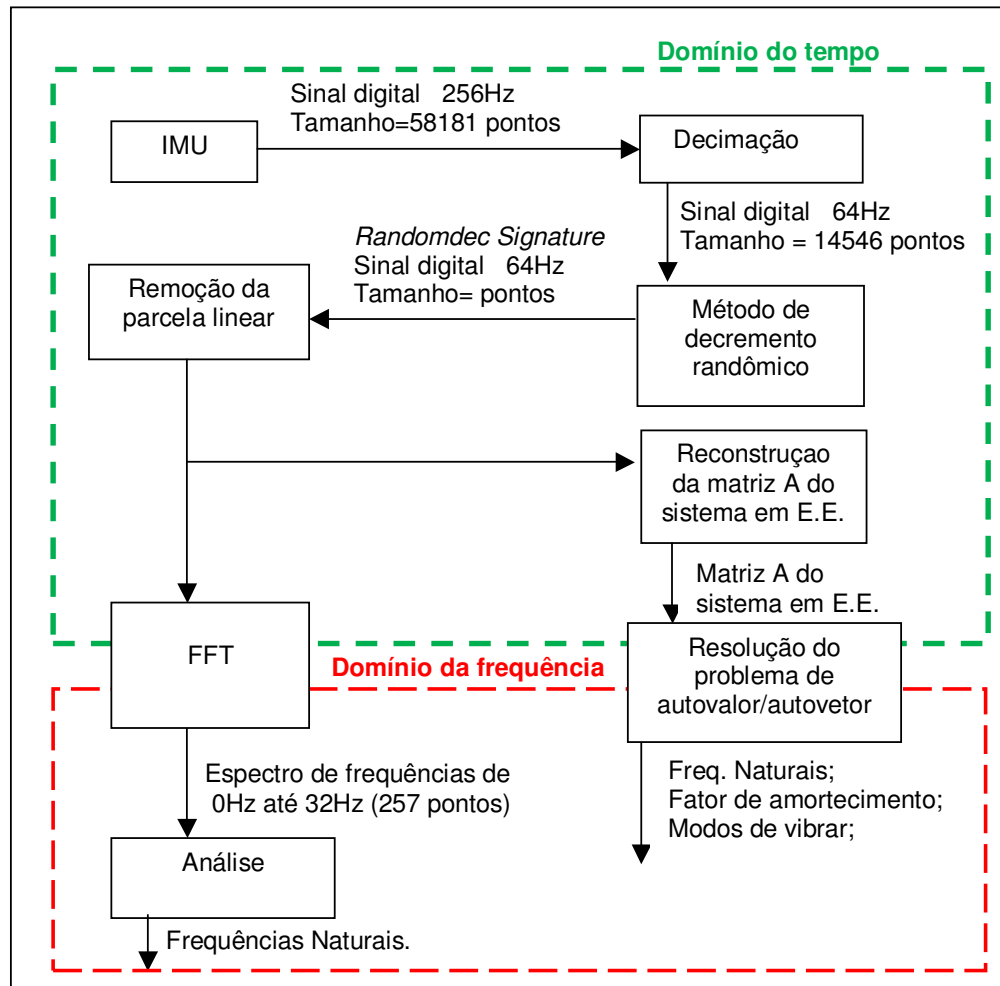


Figura 3.3- Fluxograma da segunda rota de tratamento e análise dos dados

O método de decremento randômico tem como saída o *Randomdec Signature*, que é a resposta livre da coordenada em questão devido a uma condição inicial não nula. Com esta técnica também é possível levantar a resposta livre de outras coordenadas devido àquela condição inicial. O método envolve a extração de determinados trechos do sinal e a tomada da média aritmética destes. Maiores detalhes a respeito dos fundamentos da técnica podem ser encontrados em [1].

Foram desenvolvidos dois algoritmos de decremento randômico e ambos apresentam ligeiras diferenças com relação à metodologia apontada na referência [1]. A diferença está apenas na determinação dos locais de início dos trechos. O primeiro algoritmo utiliza pontos situados dentro de uma faixa de valores e o segundo utiliza os pontos de máximos do sinal acima de um valor limite que superem os pontos vizinhos pelo menos um certo parâmetro arbitrário, enquanto a bibliografia utiliza os pontos de cruzamento do sinal com a reta horizontal de altura igual ao valor de referência.

Esta técnica assume que a excitação do sistema é randômica ou ambiental. Para verificar esta hipótese foram levantados e analisados os gráficos de autocorrelação dos sinais.

4- RESULTADOS E ANÁLISES:

-Resultados do modelo teórico

Para descrição teórica do sistema, adotaram-se os parâmetros do modelo do veículo - rigidez, amortecimento e massa- como mostrado na tabela 4.1:

Tabela 4.1- Parâmetros adotados para o modelo teórico

k_{ST} (N/m)	k_{SD} (N/m)	m_{RT} (kg)	m_{RD} (kg)	k_{PN} (N/m)	c_{PN} (Ns/m)
21000	19000	40	45	250000	70
c_{ST} (Ns/m)	c_{SD} (Ns/m)	a (m)	b (m)	M (kg)	I (kg.m ²)
1500	1500	1,5	1,0	465	550

Disto foram obtidas as frequências naturais e fatores de amortecimento como vistos na tabela 4.2 e os modos de vibrar associados pela tabela 4.3:

Tabela 4.2- Autovalor, frequência natural e fator de amortecimento do modelo teórico

Autovalor	Frequência natural (Hz)	Fator de amortecimento
$-2,6 \pm 8,0 i$	1,3	0,31
$-4,4 \pm 10,7 i$	1,8	0,38
$-17,8 \pm 74,0 i$	12,1	0,23
$-20,2 \pm 77,7 i$	12,8	0,25

Tabela 4.3- Modos de vibrar do modelo teórico

Frequência Natural (Hz)	Excitação da roda dianteira		Excitação da roda traseira		Excitação do baricentro		Excitação do ângulo de <i>pitch</i>	
	(%)	Fase(°)	(%)	Fase(°)	(%)	Fase(°)	(%)	Fase(°)
1,3	6,7	-72,7	1,7	-68,7	63,4	-107,8	28,2	-111,0
1,8	2,3	-58,6	9,7	111,8	29,1	63,3	58,8	112,4
12,1	87,6	-103,5	5,3	34,9	3,5	149,2	3,6	145,6
12,8	4,7	-147,1	87,1	104,5	6,7	144,6	4,6	-30,8

É possível depreender pelas tabelas que o modelo teórico prevê frequências naturais em torno de 1,5 Hz e 12Hz com um fator de amortecimento significativo. Uma análise mais profunda dos modos de vibrar permite afirmar que frequência em torno de 1,5Hz são as mais significativas com relação à excitação do baricentro e do ângulo de *pitch*, pois modos em torno de 12Hz representam frequências naturais majoritariamente relacionados com o movimento da roda dianteira ou traseira, portanto são pouco importantes para este estudo.

-Dados experimentais obtidos

A obtenção dos dados experimentais a serem analisados foi realizada pelo orientador deste trabalho. As figuras 4.1 até 4.9 representam os sinais medidos pela IMU durante o percurso. As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 se referem aos ângulos de Euler, as figuras 4.4, 4.5 e 4.6 às acelerações e as figuras 4.7, 4.8 e 4.9 às velocidades angulares.

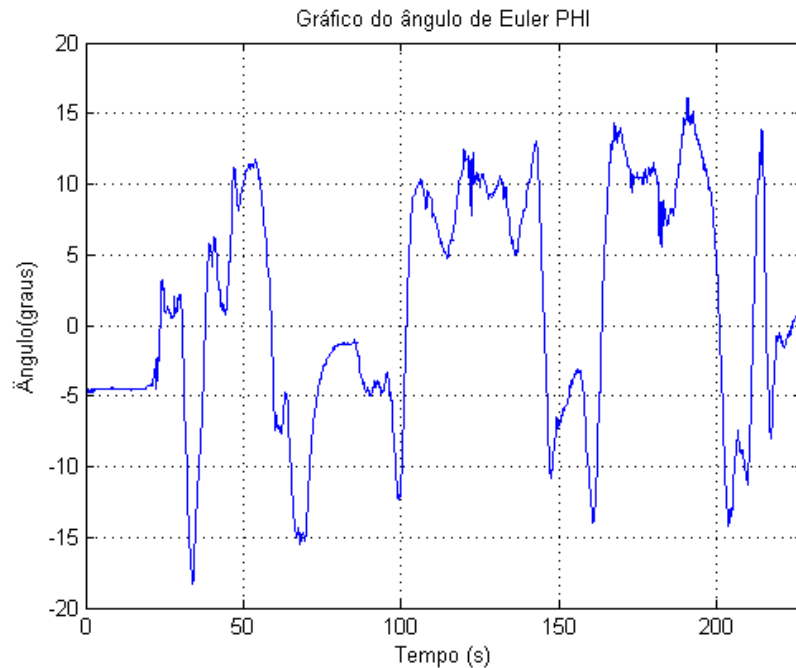


Figura 4.1- Ângulo de Euler Phi

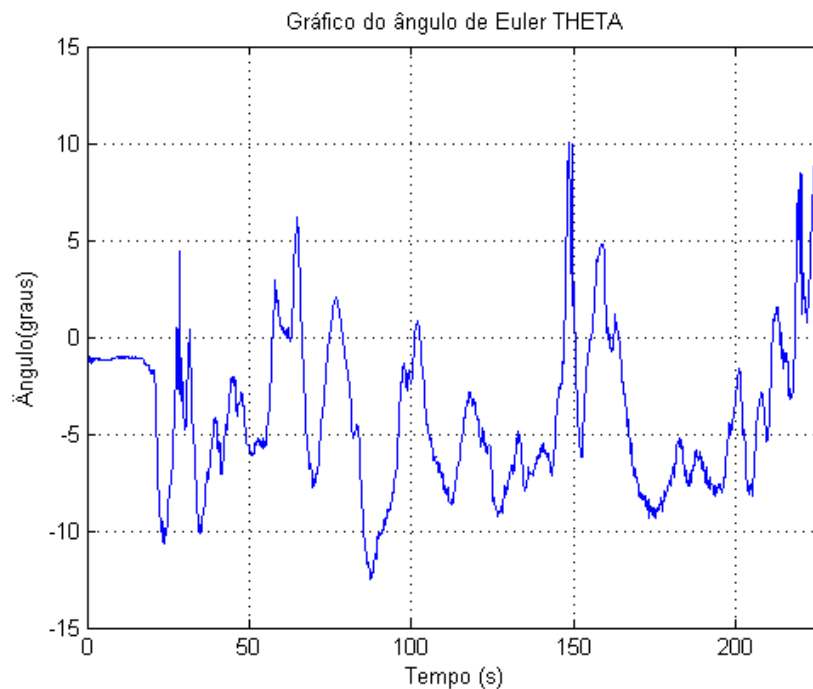


Figura 4.2- Ângulo de Euler Theta

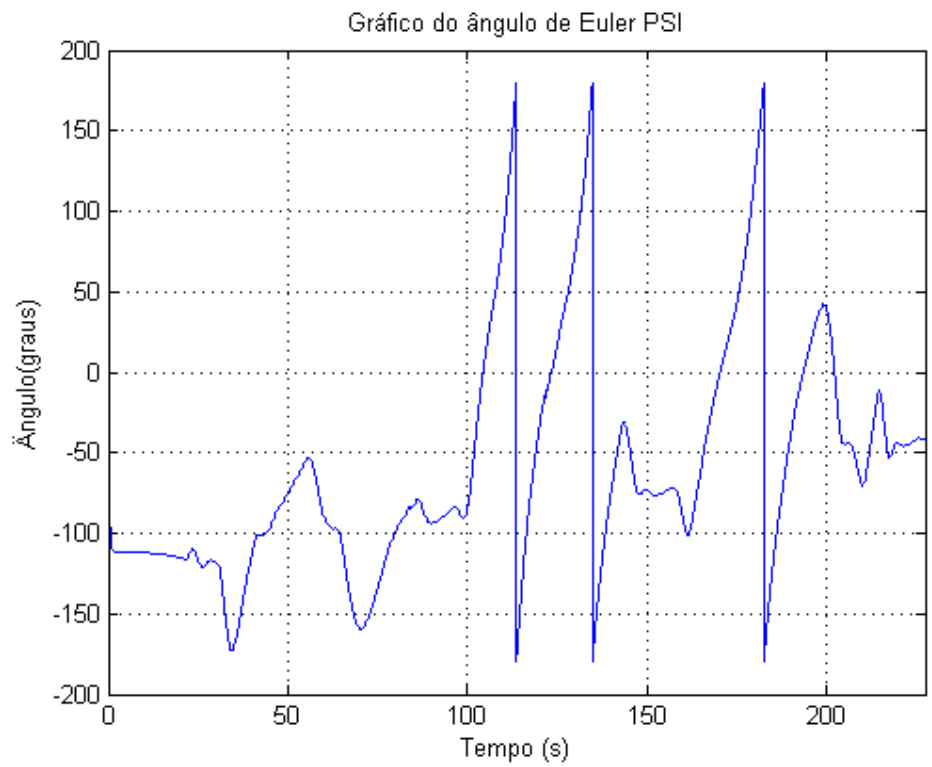


Figura 4.3- Ângulo de Euler Psi

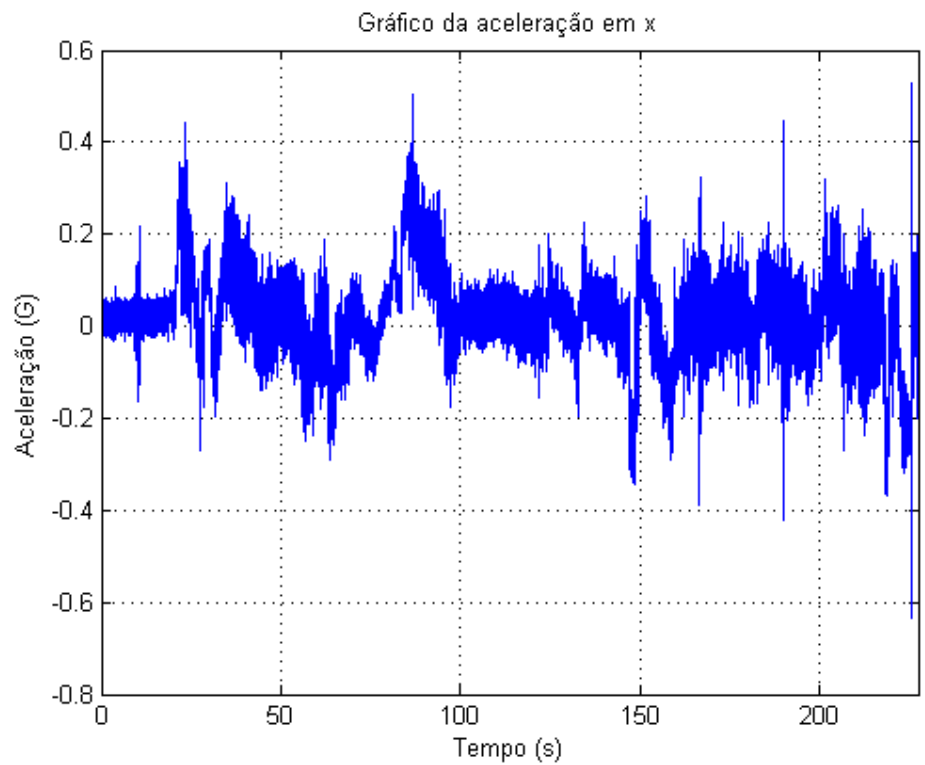


Figura 4.4- Aceleração em x

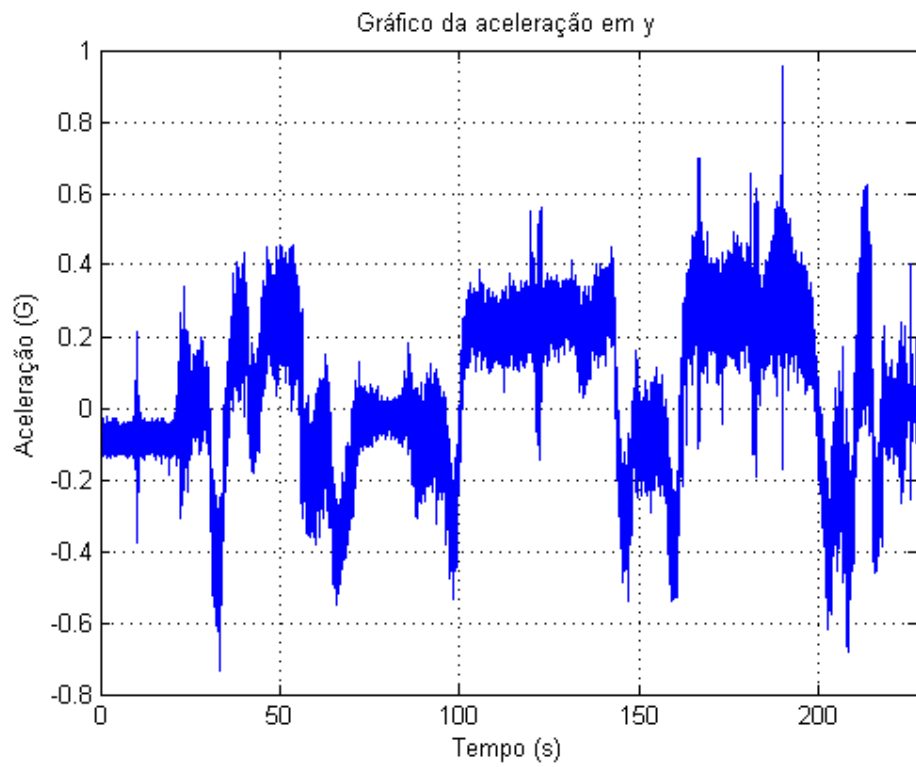


Figura 4.5- Aceleração em y

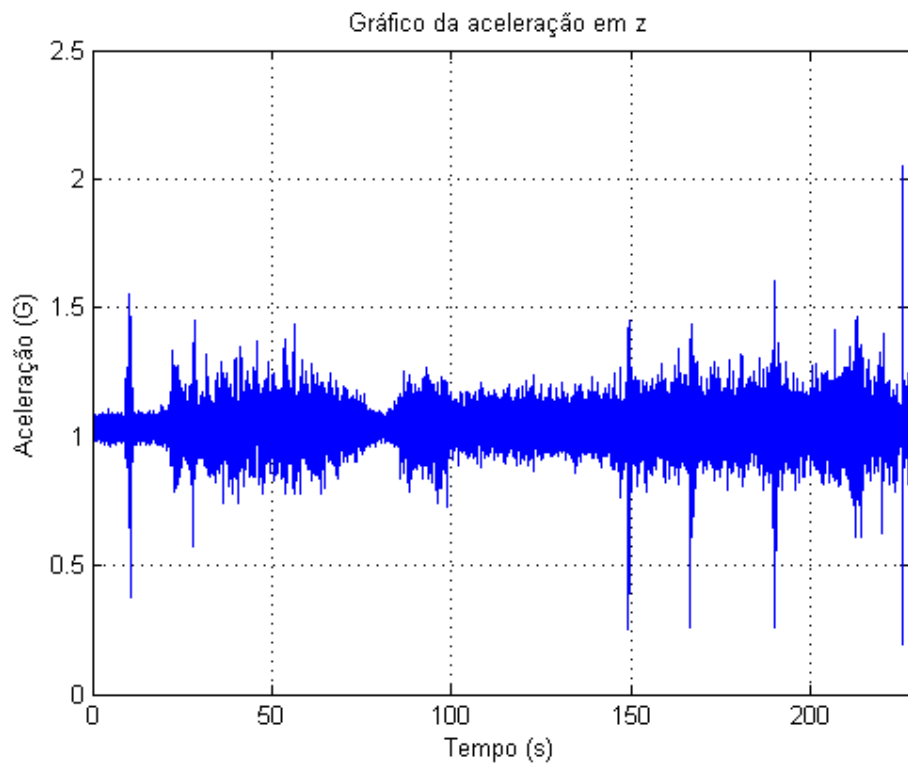


Figura 4.6- Aceleração em z

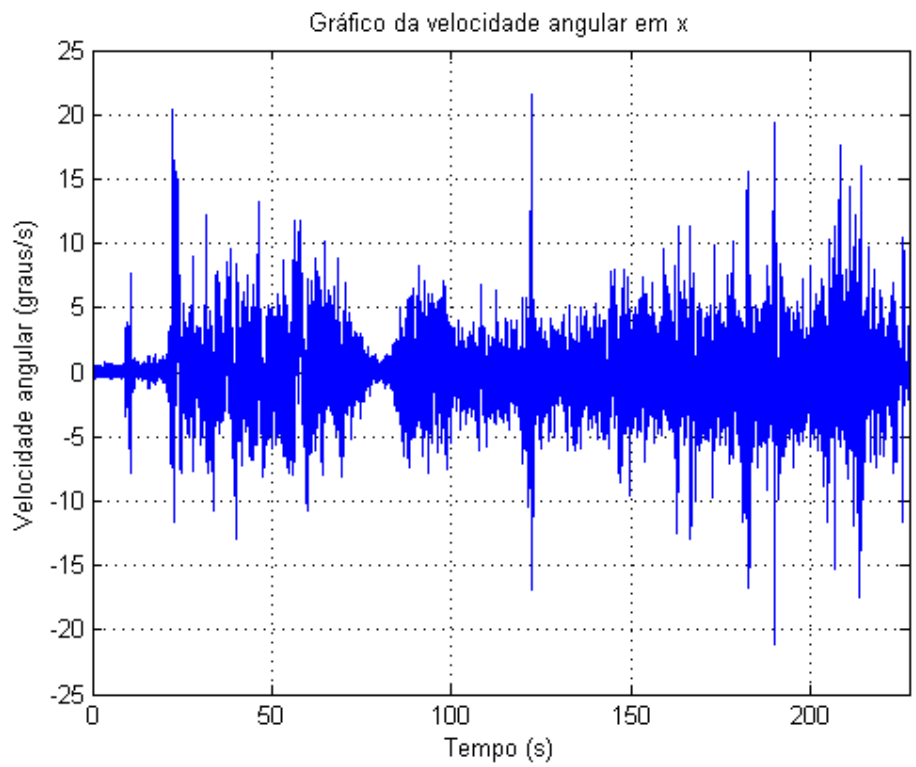


Figura 4.7- Velocidade angular em x

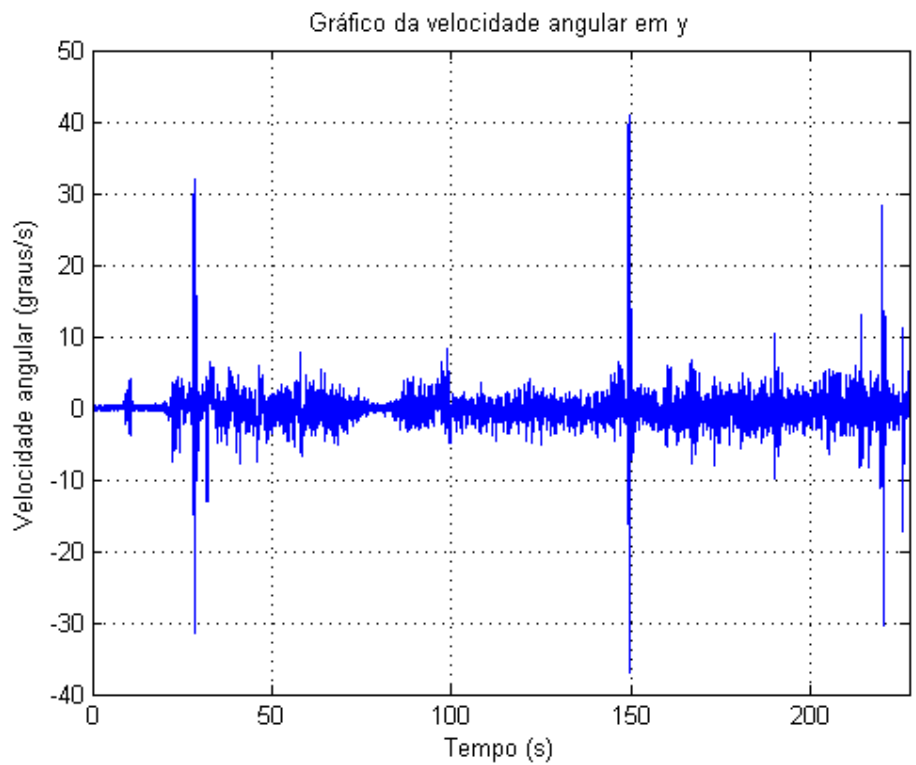


Figura 4.8- Velocidade angular em y

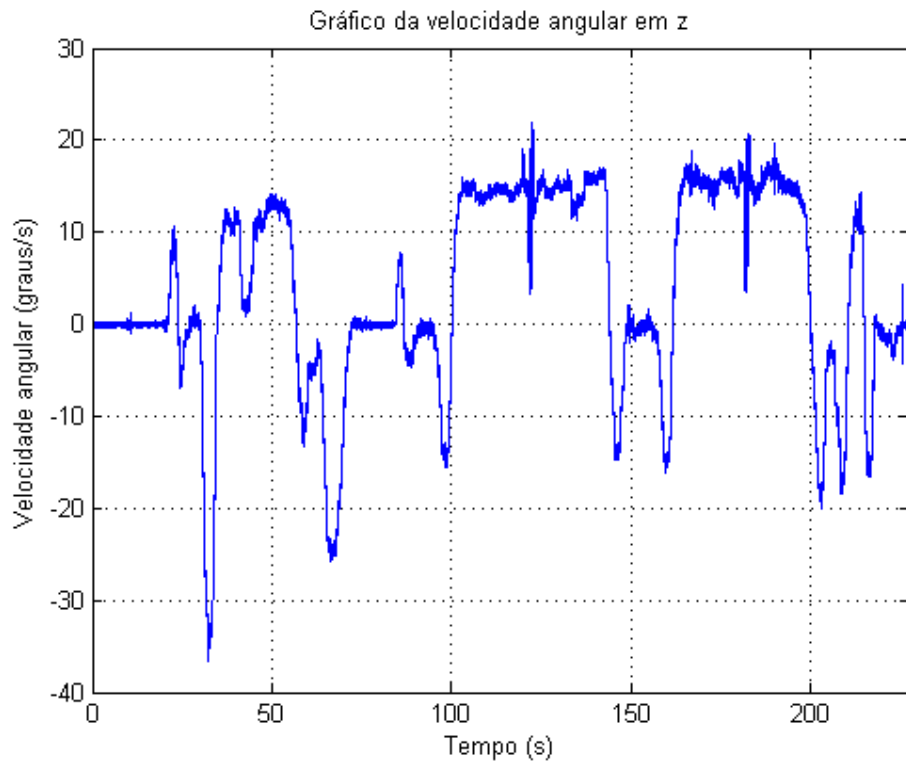


Figura 4.9- Velocidade angular em z

Como pode ser visto na figura 4.1, a hipótese de ângulo de *pitch* pequeno utilizada para a linearização do modelo teórico é para o veículo experimentado e, pela figura 4.6, fica evidente que a direção do eixo z do sistema de coordenadas é a mesma da gravidade.

Os sinais referentes às acelerações em y e z e às velocidades angulares em torno de x e y foram o foco de análise. Isso se deve ao fato que estas se relacionam com as características dinâmicas do veículo mais intimamente em detrimento às ações do motorista.

-Resultados da primeira rota:

Os espectros de frequência médios da aceleração em y e em z e da velocidade angular em x e em y foram gerados de acordo com o procedimento descrito na metodologia e podem ser observados nas figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 respectivamente.

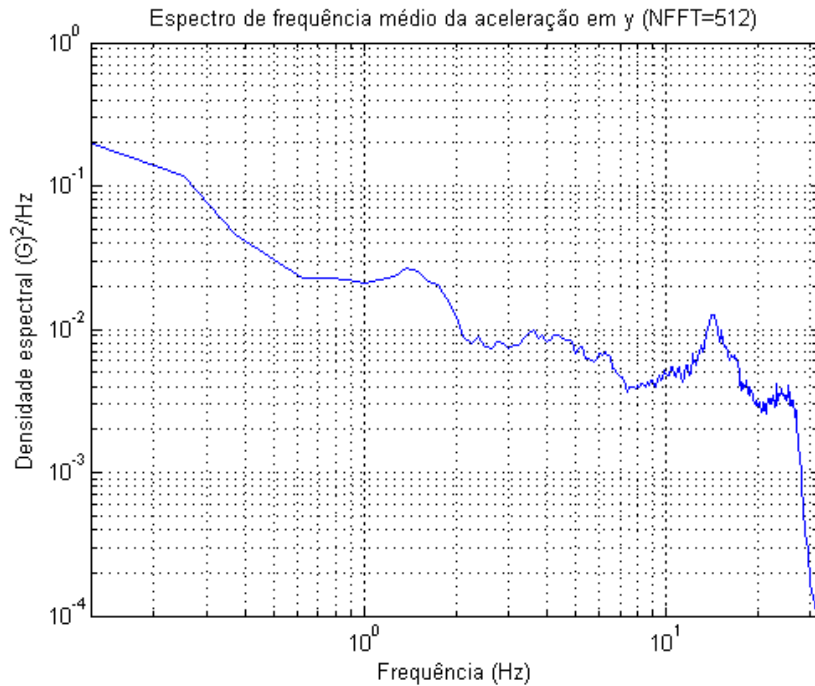


Figura 4.10- Espectro de frequência médio da aceleração em y com NFFT=512

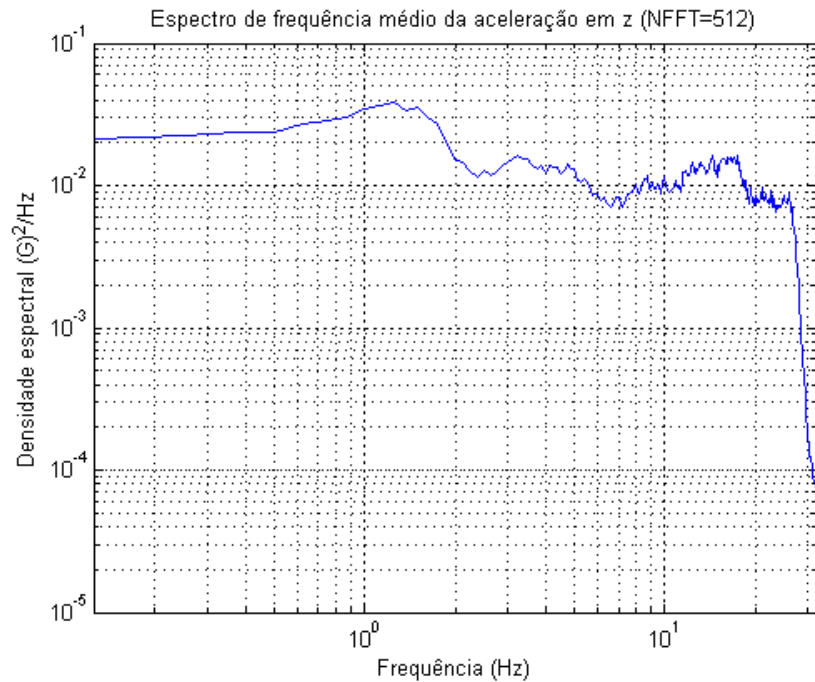


Figura 4.11- Espectro de frequência médio da aceleração em z com NFFT=512

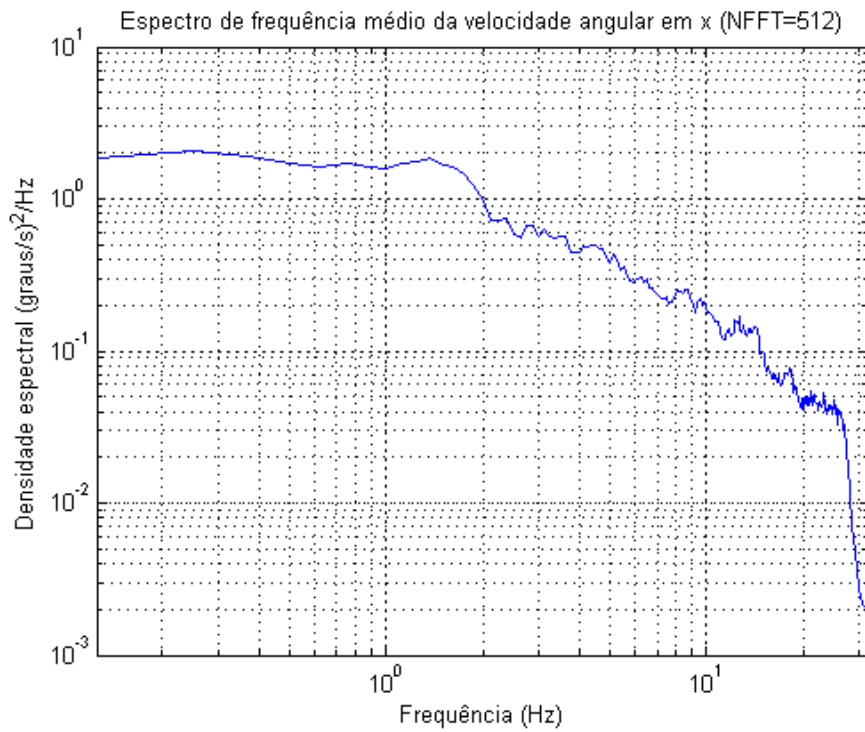


Figura 4.12- Espectro de frequência médio da velocidade angular em x com NFFT=512

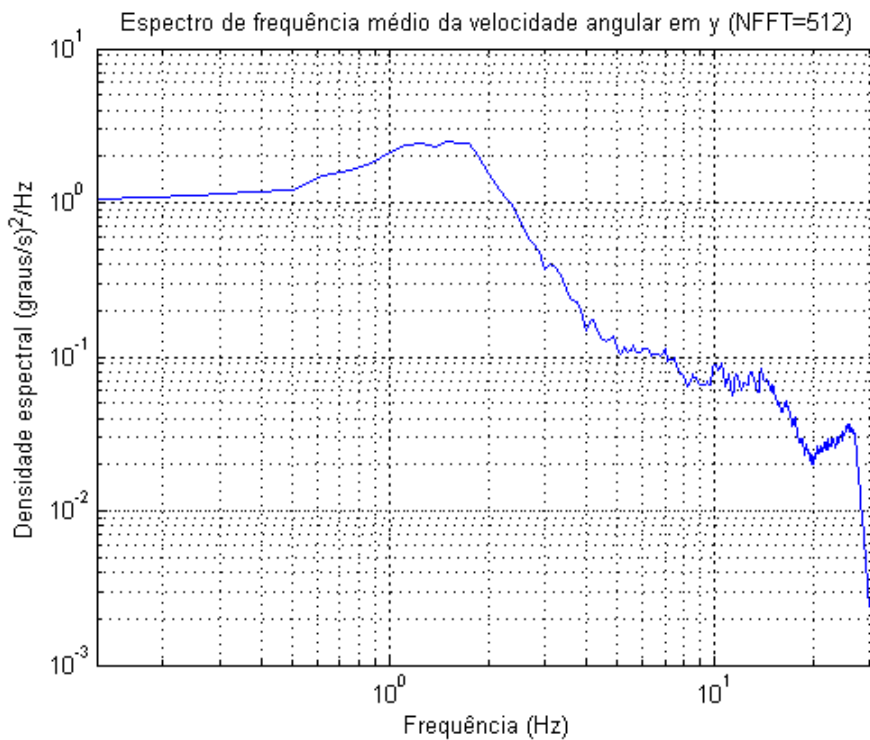


Figura 4.13- Espectro de frequência médio da velocidade angular em y com NFFT=512

É evidente, pela leitura dos gráficos, que existem claramente picos de máximo local para frequências em torno de 1,5Hz para todos os casos, em conformidade com as previsões do modelo teórico. As figuras 4.11 e 4.13 sugerem que existem duas frequências naturais nesta região, entretanto, não é possível afirmar a existência de múltiplas frequências naturais na região. No apêndice B podem ser encontrados espectros de frequência das mesmas coordenadas com maiores resoluções, porém, os resultados continuam inconclusivos.

Já nas imagens 4.10 e 4.11 é possível notar um pico de máximo local em frequências em torno de 15Hz, que é extremamente bem definido para o espectro da aceleração em y e sutil para o da aceleração em z. Porém, provavelmente, o fato desta frequência natural coincidir com a previsão do modelo teórico de frequência natural nesta região foi um mero acaso, uma vez que o modelo utilizado não contemplava movimentações em y e também não foram observados picos evidentes no espectro da velocidade angular em y na região.

-Resultado da segunda rota:

O primeiro passo a ser realizado é verificar qual dos sinais se caracteriza como resposta à excitação do tipo randômica/ambiental. Para tanto foram calculados a autocorrelação de cada sinal, como mostrado nas figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17.



Figura 4.14- Autocorrelação da aceleração em y

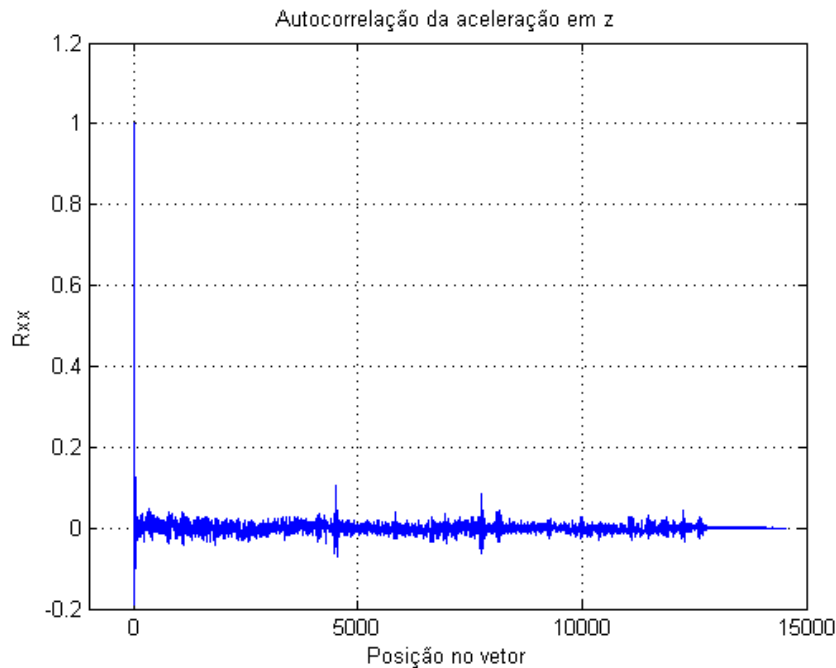


Figura 4.15- Autocorrelação da aceleração em z

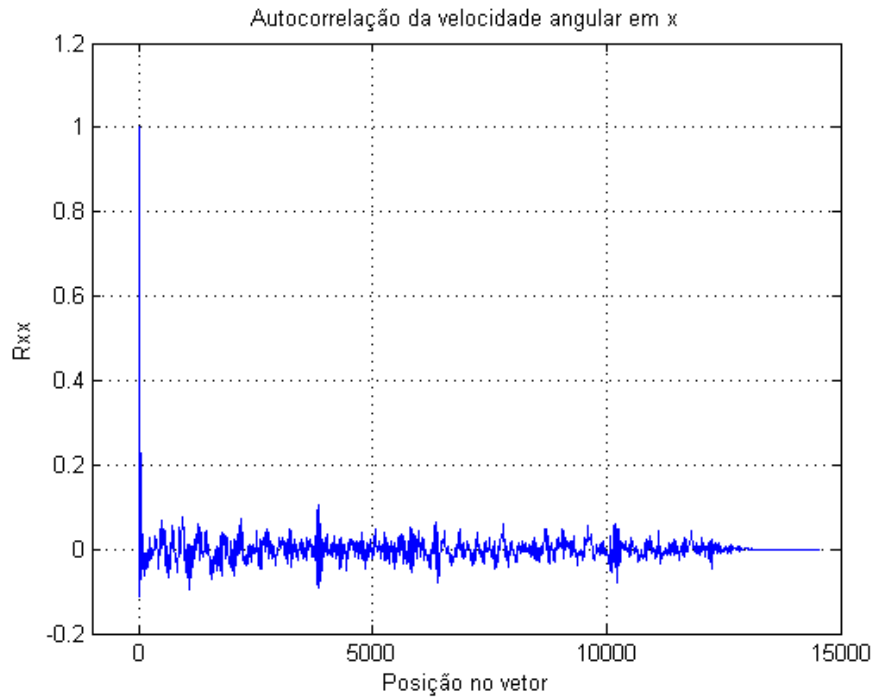


Figura 4.16- Autocorrelação da velocidade angular em x

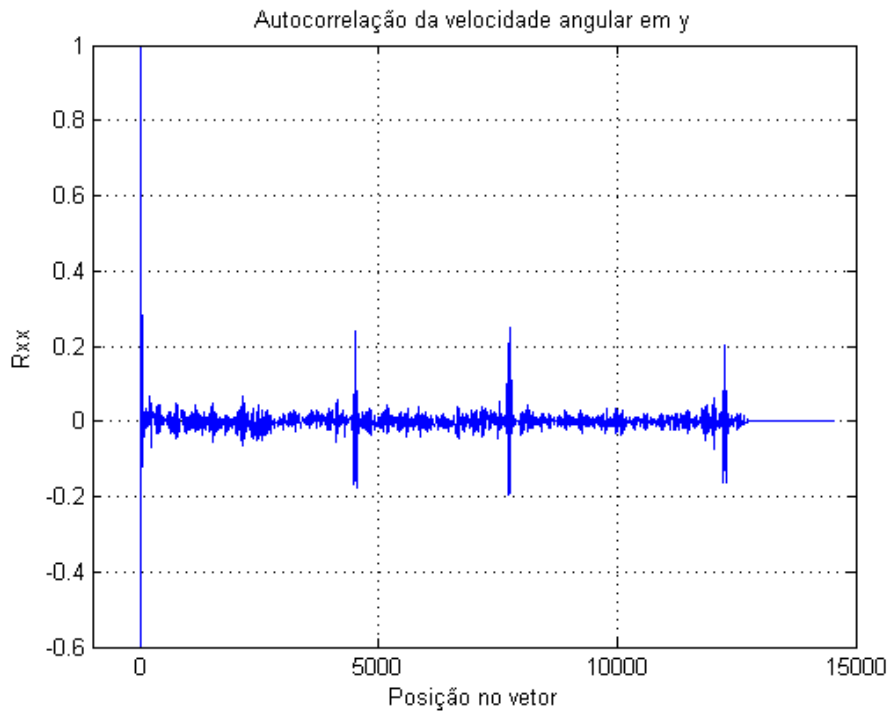


Figura 4.17- Autocorrelação da velocidade angular em y

As figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam o formato característico de respostas à excitação randômica/ambiental. Este formato apresenta valor unitário para a posição zero e aproximadamente zero para todas as demais posições. O mesmo não ocorre com a figura 4.14, fato que inviabiliza a aplicação do método para a aceleração em y.

Ambos os algoritmos de decaimento randômico dependem da adoção de uma faixa de corte ou valor limite para a localização do local de início dos trechos, que, por meio de uma média, fornece a resposta de decaimento livre da coordenada. As figuras 4.18, 4.19 e 4.20 ilustram as faixas de corte e valores limite nos sinais decimados.

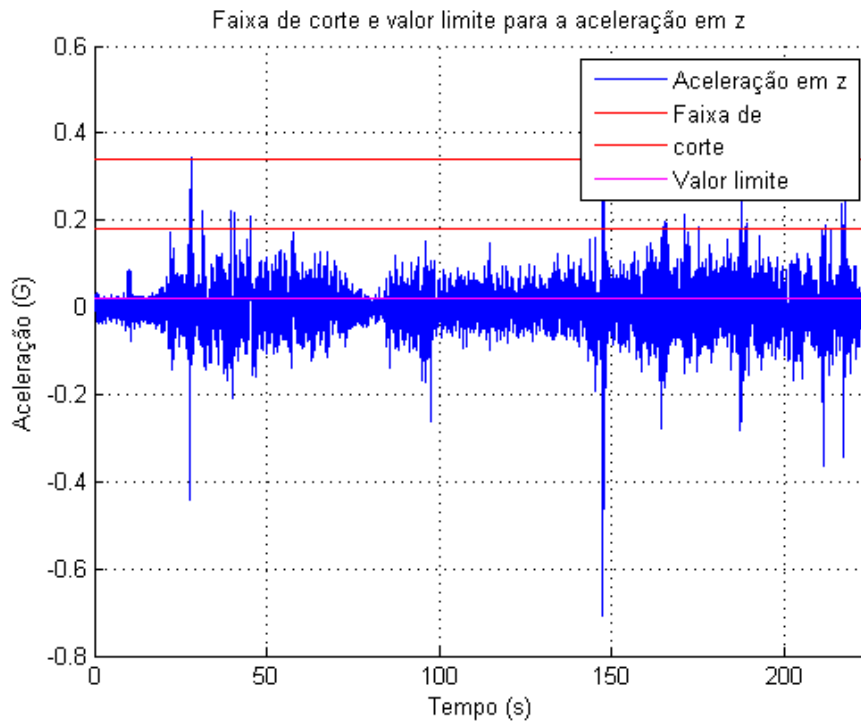


Figura 4.18- Faixa de corte e valor limite para a aceleração em z

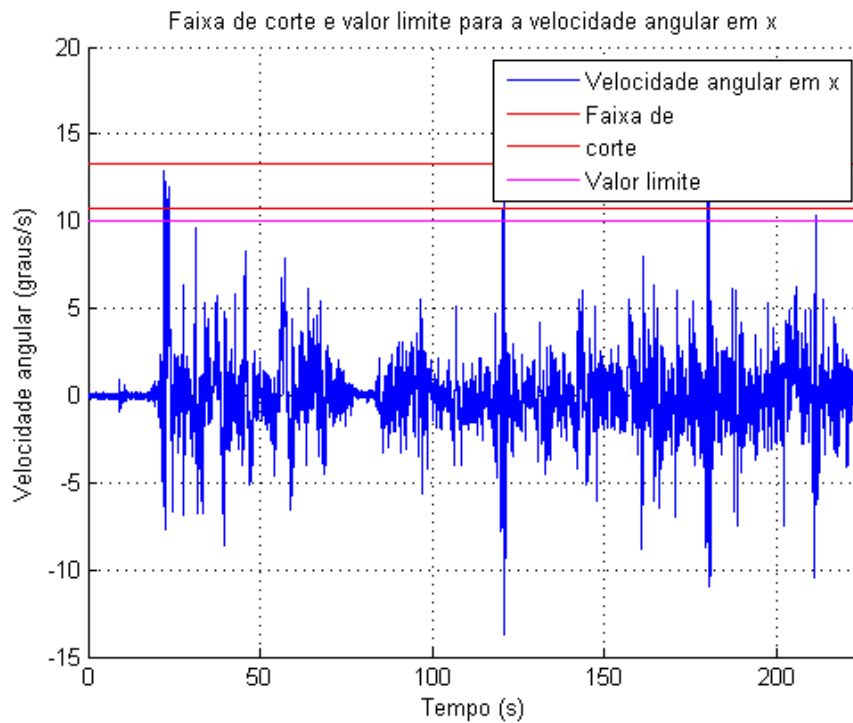


Figura 4.19- Faixa de corte e valor limite para a velocidade angular em x



Figura 4.20- Faixa de corte e valor limite para a velocidade angular em y

A partir disto foram obtidas as resposta de decaimento livre, figuras 4.21, 4.22 e 4.23.

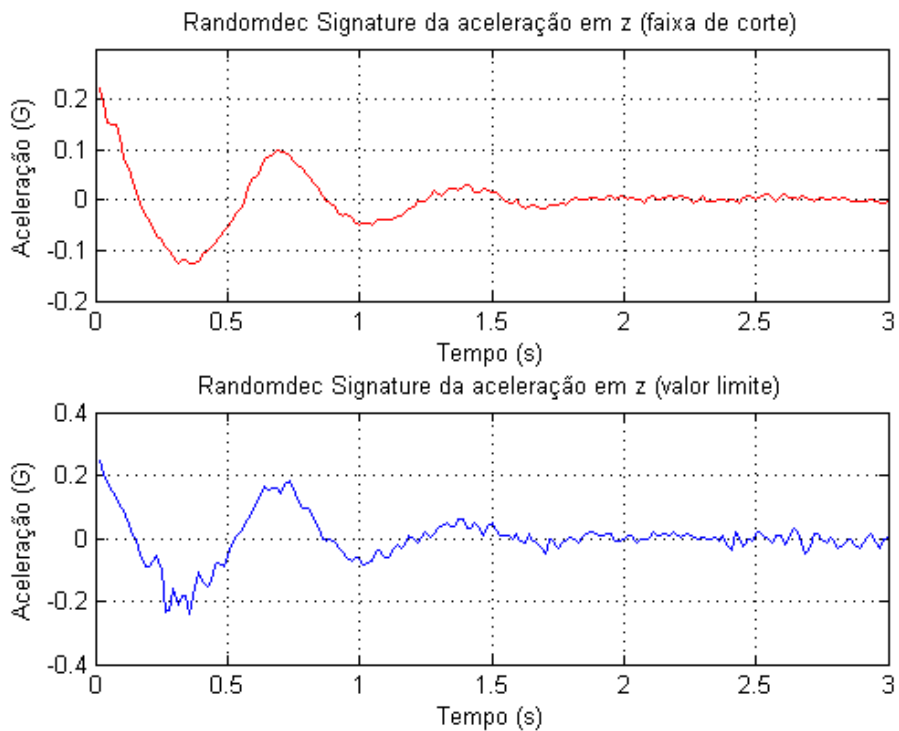


Figura 4.21- *Randomdec Signature* da aceleração em z

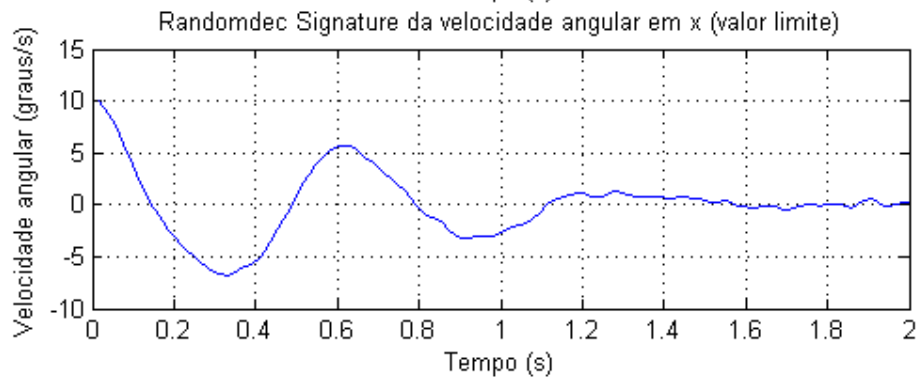
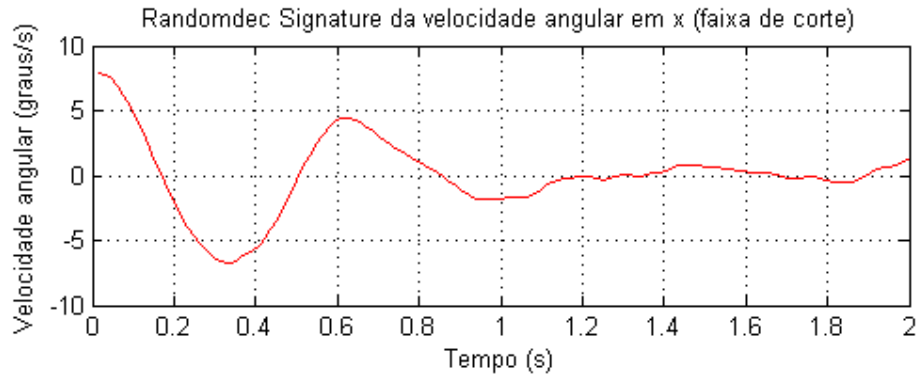


Figura 4.21- *Randomdec Signature* da velocidade angular em x

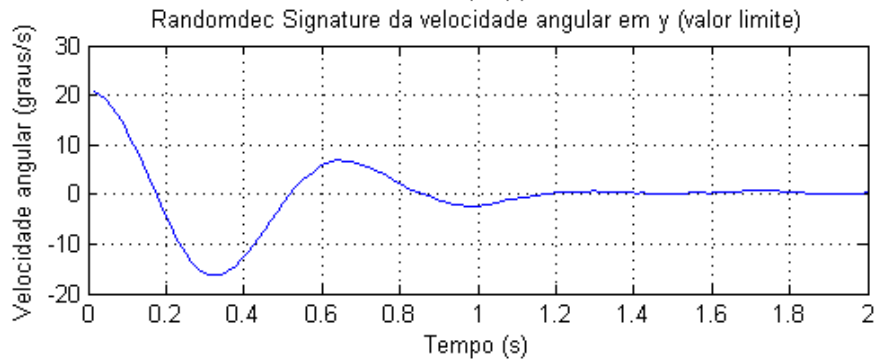
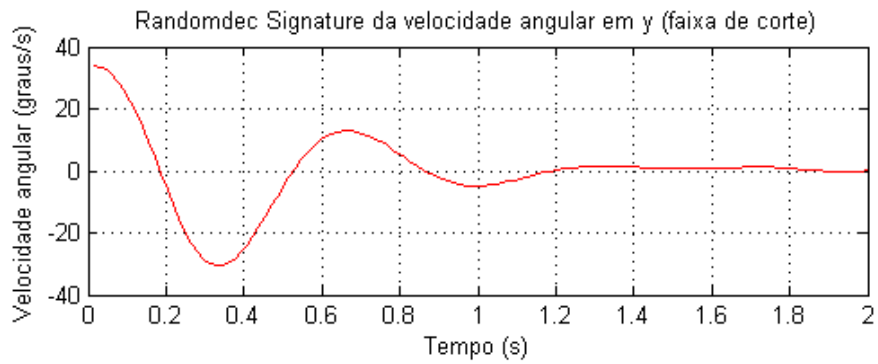


Figura 4.21- *Randomdec Signature* da velocidade angular em y

As respostas geradas podem ser facilmente analisadas com a aplicação de uma FFT do sinal, como mostradas nas figuras 4.22, 4.23 e 4.24.

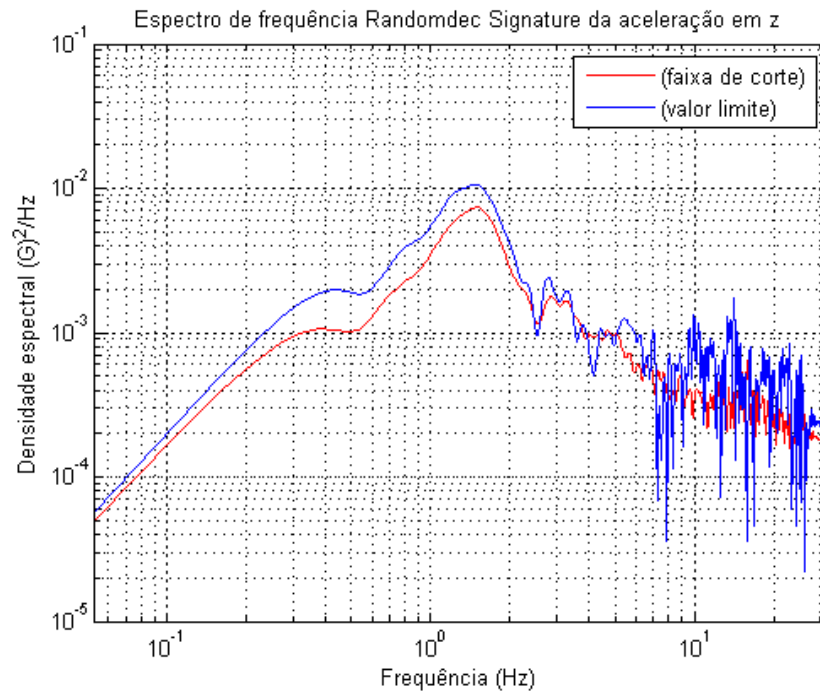


Figura 4.22- Espectro de frequência do *Randomdec Signature* da aceleração em z

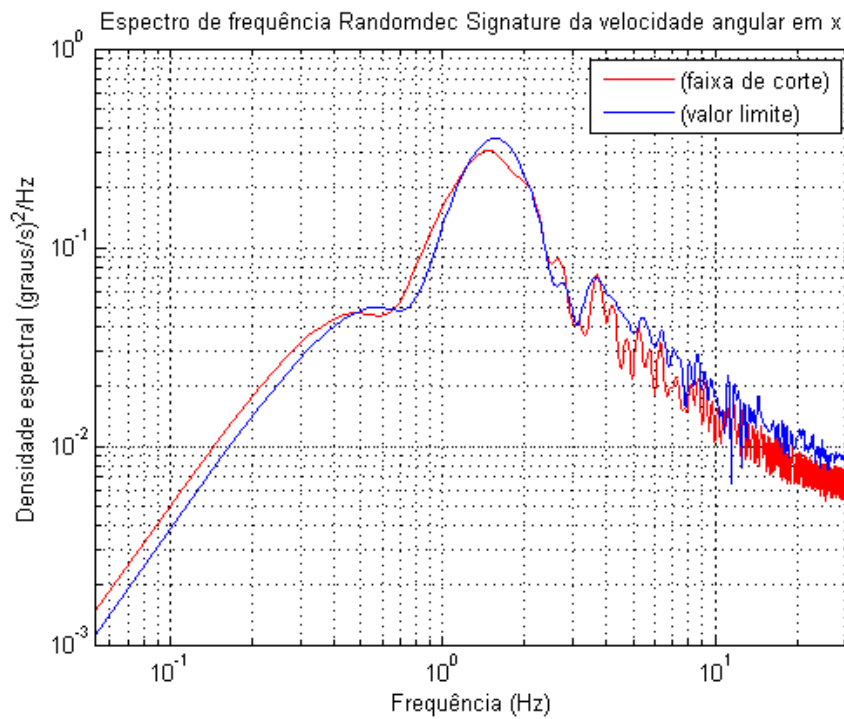


Figura 4.23- Espectro de frequência do *Randomdec Signature* da velocidade angular em x

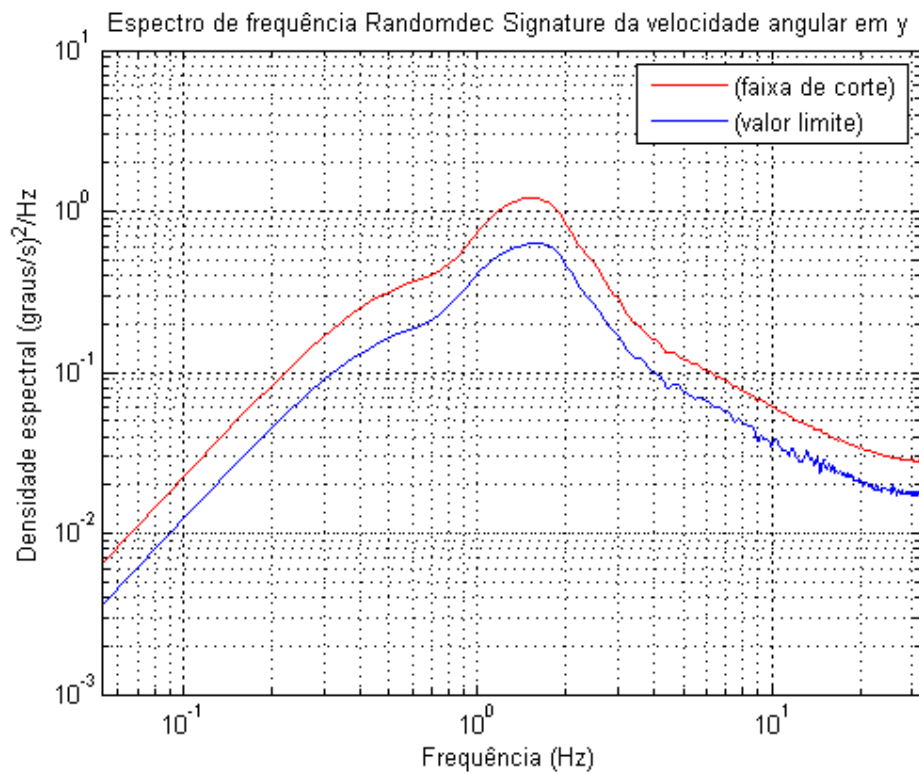


Figura 4.24- Espectro de frequência do *Randomdec Signature* da velocidade angular em y

Pelas figuras, é possível depreender a existência clara de um único pico em 1,5 Hz. Particularmente a figura 4.22 apresenta outros picos em torno de 15Hz, porém estes apresentam muito ruído, o que dificulta a tomada de conclusões.

Outra abordagem da técnica de decaimento randômico é gerar a resposta livre de múltiplas coordenadas simultaneamente. Obteve-se a Randomdec Signature da velocidade angular em y devido a uma condição inicial em z. Disto tem-se a resposta de decaimento livre nas coordenadas angulares em y (ângulo de *pitch* θ) e nas coordenada z. Por meio da realização de derivações e integrações é possível construir a matriz A do sistema em espaço de estados através da seguinte equação:

$$\begin{Bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} = [A] \cdot \begin{Bmatrix} z \\ \theta \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix}$$

O conhecimento da matriz A permite a resolução do problema de autovalor/autovetor associado, resultando no conhecimento das frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibrar.

Aplicando este procedimento obtiveram-se as respostas de decaimento livre das coordenadas e suas derivadas, de acordo com as figura 4.25 e 4.26.

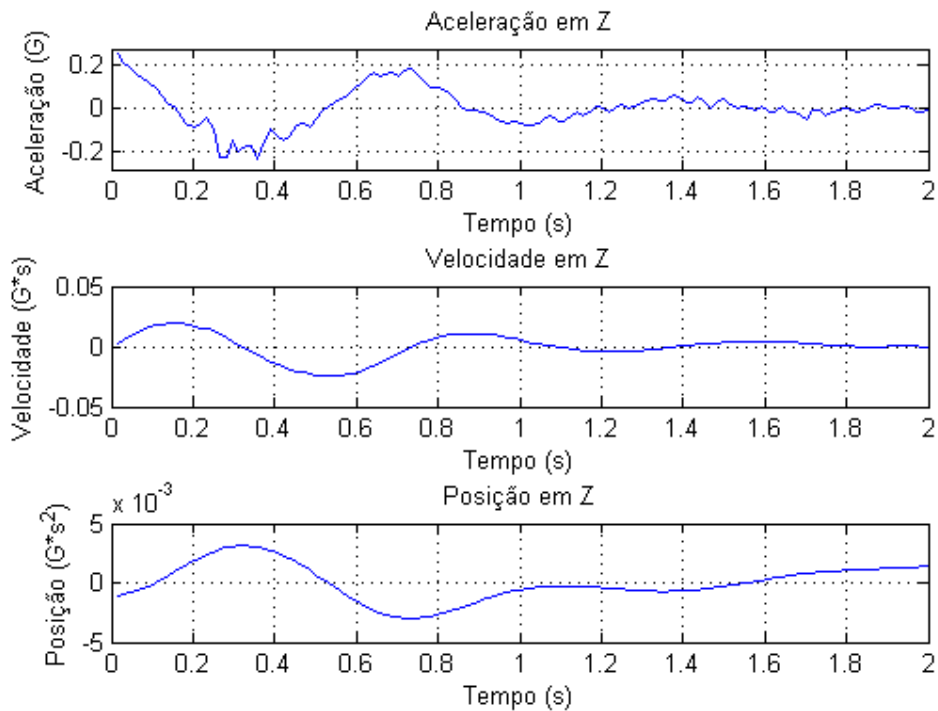


Figura 4.25- Resposta livre da coordenada z e suas derivadas

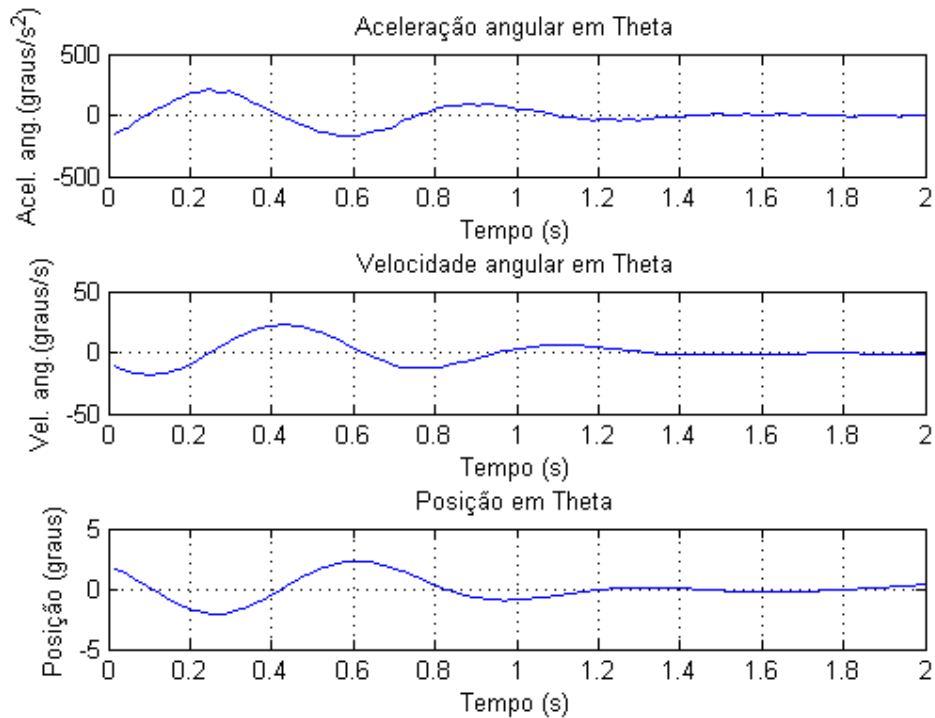


Figura 4.26- Resposta livre do ângulo Θ e suas derivadas

A matriz A encontrada foi:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -164,5 & 0,05 & 19,7 & 0,01 \\ 17161 & -398 & 95114 & 13,9 \end{bmatrix};$$

Pela resolução do problema de autovalor/autovetor:

Tabela 4.4- Autovalores, frequência natural e fator de amortecimento da matriz A

Autovalor	Frequência natural (Hz)	Fator de amortecimento
-2.1 +33.2i	5.3	0.06
-0.8 + 7.1i	1.1	0.11

Tabela 4.5- Modos de vibrar

Frequência natural (Hz)	Excitação em z		Excitação em Θ	
	(%)	Fase(°)	(%)	Fase(°)
5.3	0,03	142.3	99,97	-86.3
1.1	0,03	165.3	99,97	96.2

Pode-se observar pelas tabelas 4.4 e 4.5 que, embora uma das frequências naturais esteja próxima de 1.5Hz, o resultado obtido está incorreto, já que o fator de amortecimento está muito abaixo do esperado e os modos de vibrar estão visivelmente desbalanceados. A outra frequência natural de 5.3Hz é dúbia, uma vez que o fator de amortecimento é incrivelmente baixo e este resultado não foi previsto pelo modelo teórico. Alguns dos gráficos de FFT médio da primeira rota apresentaram sutis variações de magnitude nesta região, em torno de 5Hz, porém estas variações podem ter sido causadas por outros mecanismos, como por exemplo ruído, e não foram consideradas relevantes.

Os resultados obtidos pela reconstrução da matriz A do problema não foram satisfatórios e as causa disto podem ter sido várias. O processo de integração e derivação dos sinais podem ter introduzido erros nas respostas, assim como os processos de inversão das matrizes. Também, as respostas de decaimento livre poderiam não estar precisas o suficiente devido à escolha inadequada dos parâmetros do método.

Alternativamente, devido às dificuldades anteriores, foi aplicada a técnica de decremento logarítmico. Tomaram-se as respostas livres referentes às primeiras derivadas dos sinais para esta análise devido a maior facilidade de identificação dos picos e pelo formato que mais se aproxima de respostas de decaimento livres. Os resultados foram:

Tabela 4.6 – Resultado via técnica de decremento logarítmico

Local de aplicação do método	Primeiros picos consecutivos da primeira derivada de z		Primeiros picos consecutivos da primeira derivada de theta	
	Positivos	Negativos	Positivos	Negativos
Tempo entre picos (s)	0,66 s	0,70 s	0,66 s	0,67 s
Freq. do sinal f (Hz)	1,52 Hz	1,41 Hz	1,52 Hz	1,49 Hz
Freq. do sinal ω_n (rad/s)	9,56 rad/s	8,94 rad/s	9,57 rad/s	9,4 rad/s
Fator de amortecimento	0,25	0,13	0,20	0,06

Pode-se observar que as frequências obtidas são realmente muito próximas de 1,5Hz, de acordo com o previsto pelos outros métodos de análise. Já com relação ao fator de amortecimento, percebe-se que há uma dispersão maior dos resultados, e que em média o valor do fator de amortecimento é de 0.14.

5- CONCLUSÕES:

Durante o estudo da teoria da identificação modal pode-se notar que a análise modal se fundamenta basicamente em dois pilares principais. O primeiro, o conhecimento da mecânica, e o segundo, as técnicas de análise de sinais e sistemas. O domínio de ambas as competências é essencial tanto para compreender quanto para aplicar corretamente as técnicas de análise modal.

O modelo adotado para o estudo foi o de *Pitch and Bouce*. Por meio da tomada de hipóteses simplificadoras, equacionamento, adoção de valores para os parâmetros e resolução de problema de autovalor foi realizada a identificação modal teórica do veículo. Os resultados desta análise serviram como estimativas iniciais para valores de frequência natural, fator de amortecimento e modos de vibrar. O modelo de $\frac{1}{2}$ de veículo previu a existência de duas frequências naturais próximas entre si em torno de 1,5 Hz, de extrema relevância ao ângulo de *pitch* e movimentação vertical do baricentro, e outras duas frequências naturais em torno de 15Hz, associadas majoritariamente à coordenada das rodas.

Os dados experimentais foram obtidos por meio de um veículo modelo *Corolla* instrumentado com uma unidade inercial móvel. Estes dados descreviam a resposta do veículo devido à realização de um dado percurso. A resposta estava descrita em termos de ângulos de Euler, velocidades angulares e acelerações lineares.

A análise dos dados foi feita por duas rotas. A primeira envolveu a divisão do sinal em trechos, a aplicação da FFT nos trechos e o cálculo do espectro de frequência médio. Essa rota indicou a presença clara de frequências naturais em torno de 1,5Hz, como previsto no modelo teórico. Embora alguns gráficos sugeriam a existência de mais de uma frequência natural nesta região, não se pode afirmar isto com segurança. Seria necessário realizar testes mais específicos para determinar a existência ou não de múltiplas frequências naturais e seus valores. Pode-se notar também outra frequência natural clara em torno de 15Hz, porém o fato de a previsão do modelo teórico coincidir com ela é mero acaso, uma vez que o modelo utilizado não previa o efeito de *roll*.

A segunda rota envolveu a aplicação do método de decremento randômico. Devido à limitação da técnica ser apenas aplicável em respostas a excitações randômicas os sinais analisados foram os relativos às velocidades angulares em x e y e a aceleração em z. A aplicação da FFT nos *Randomdec Signatures* obtidos revelou resultados muito semelhantes ao da primeira rota. Todos os gráficos apresentaram picos em 1,5 Hz e, para o gráfico referente à aceleração em z, pode-se observar a existência de outra frequência natural em torno de 15Hz. A análise via reconstrução da matriz A do sistema em espaço de estados se mostrou infrutífera, embora uma das frequências naturais estivesse próxima de 1,5Hz, todas as demais informações indicavam erros no resultado. Alternativamente, foi-se aplicada a técnica de decremento logarítmico nas respostas de decaimento livres e obtiveram frequências em 1,5 Hz e fator de amortecimento em torno de 0,14.

Em suma, pode-se concluir que o veículo em questão apresenta pelo menos uma frequência natural em torno de 1,5Hz e outra frequência em 15 Hz.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] HE, J. e FU, Z., *Modal Analysis*, 2001. p.1-149; 188-191.
- [2] OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*, 2011.
- [3] EWINS, D. J. *Modal Testing*
- [4] INMAN, D. J. *Engineering vibration*, 2001.
- [5] HAYES, M. H. *Statistical digital signal processing and modeling*, 1996.
- [6] SMITH, S. W., *Digital Signal Processing - A Practical Guide for Engineers and Scientists*, 2003.
- [7] MOURA, E. D. A., *Estudo de suspensões passive, semi-ativa MR e ativa*, Itajubá, 2003 (Tese de mestrado pela Universidade Federal de Itajubá).