

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

**Modelagem e projeto de um sistema de controle ótimo da suspensão semi-ativa
de um automóvel**

Eduardo Moretti
Guilherme Fernandez Baptista

São Paulo
2015

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

**Modelagem e projeto de um sistema de controle ótimo da suspensão semi-ativa
de um automóvel**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Eduardo Moretti
Guilherme Fernandez Baptista

Orientador: Roberto Spinola Barbosa

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2015

RESUMO

O conforto veicular tem sido pauta de pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos no universo automobilístico, visando uma evolução nos automóveis. Uma forma possível de se aprimorar o conforto veicular é com a implementação de sistemas de controle de suspensão semi-ativos. Entre os sistemas de controle semi-ativos, os Magneto-reológicos tem sido utilizados amplamente, tanto na indústria automotiva quanto em outros segmentos.

Baseado nesse cenário, o presente trabalho inicialmente avalia a bibliografia disponível sobre o assunto para então modelar o sistema de suspensão veicular, modelar as irregularidades presentes na estrada e por final elaborar o projeto de um sistema de controle para o sistema de suspensão semi-ativo veicular com o objetivo de melhorar a conforto dos passageiros. Foram estudadas algumas possibilidades de técnicas para o projeto do controlador. As alternativas foram avaliadas por uma matriz de decisão e por fim o controlador foi sintonizado pelo método LQR.

Os resultados das simulações com o controle semi-ativo e sem esse tipo de controle foram comparados com o intuito de avaliar o ganho no conforto veicular. Percebeu-se uma melhora na resposta do sistema e um aumento no conforto dos passageiros.

Palavras chave: suspensão veicular, modelagem, controle ótimo, suspensão semi-ativa

ABSTRACT

Vehicular comfort has been the subject of researches and technological developments in the automotive industry, in order to improve automobiles. One possible way to improve vehicle comfort is with the implementation of semi-active suspension control systems. Among the semi-active control systems, Magneto-rheological has been widely used in automotive industry and other segments.

Based on this scenario, this work analyzes the literature on this subject and then it presents the modeling of the vehicle suspension system, the track irregularities and the development of the the control project for the vehicle semi-active suspension system in order to improve the passengers ride comfort. Some control techniques have been studied and then they were evaluated by a decision matrix in order to define the best alternative. This control system was tuned mainly by LQR method.

Ultimately, the results of simulations with the semi-active control system and without this kind of control were compared in order to evaluate the improvement of the comfort. It can be noticed that the system dynamic response improved as well as the ride comfort.

Key words: car suspension, modeling, optimal control, semi-active suspension

Moretti, Eduardo

Modelagem e projeto de um sistema de controle ótimo da suspensão semi ativa de um automóvel / E. Moretti, G. Fernandez Baptista -- São Paulo, 2015. 265 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Mecânica Automotiva 2.Amortecedores 3.Suspensão Mecânica
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t. III.Fernandez Baptista, Guilherme

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representações esquemáticas dos sistemas passivo (a), semi-ativo (b) e ativo (c). Adaptado de (Darus, 2008).....	21
Figura 2 - Modelo de $\frac{1}{4}$ de carro simples (Crivellaro, 2008).....	22
Figura 3 - Modelo de $\frac{1}{4}$ de carro com massa suspensa (Junior, 2006)	23
Figura 4 - Modelo de $\frac{1}{2}$ carro. Adaptado de (Bayrakdar, 2010).....	24
Figura 5 - Modelo do carro completo (Crivellaro, 2008).....	25
Figura 6 - Direções de medida da vibração no corpo humano (ISO, 1978).....	26
Figura 7 - Limite de exposição, fadiga e conforto para 1 minuto e 24 horas de exposição à vibração no corpo humano de acordo com a norma ISO 2631 (ISO, 1978)	27
Figura 8 - Fatores de ponderação do sinal de aceleração de acordo com a frequência de excitação. Adaptado de (ISO, 1997)	28
Figura 9 - Tipos de suspensão relacionados às grandezas que devem ser medidas (Ferreira, 2003)	30
Figura 10 - Sensor de deslocamento na suspensão dianteira de um Corvette. (Crivellaro, 2008).....	31
Figura 11 - Válvula magneto-reológica usada no Corvette (Crivellaro, 2008).....	33
Figura 12 - Modelo Bouc-Wen de um amortecedor magneto-reológico (Crivellaro, 2008).	33
Figura 13 - Diagrama de Blocos do sistema. Adaptado de (Barbosa, 2011).	36
Figura 14 - Diagrama de Bode para estabilidade e desempenho robustos (Crivellaro, 2008)	38
Figura 15 - Sistema de referência adotado para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro. Adaptado de (Junior, 2006; Barbosa, 2011).....	41
Figura 16 - Sistema de referência adotado para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro. Adaptado de (Bayrakdar, 2010)	43
Figura 17 - Sistema de referência adotado para o modelo de carro completo. Adaptado de (Mathworks, 2012).....	46
Figura 18 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	51

Figura 19 - Deslocamento e velocidade da massa não suspensa para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	51
Figura 20 - Deformação e velocidade de deformação da mola para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	52
Figura 21 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	53
Figura 22 - Deslocamento e velocidade da massa não suspensa para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	53
Figura 23 - Deformação e velocidade de deformação da mola para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	54
Figura 24 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	55
Figura 25 - Deslocamento e velocidade da massa não suspensa para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	55
Figura 26 - Deformação e velocidade de deformação da mola para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	56
Figura 27 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	58
Figura 28 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	59
Figura 29 - Deslocamento e velocidade das massas não suspensas para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	59
Figura 30 - Deformação e velocidade de deformação das molas para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	60
Figura 31 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	61
Figura 32 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	61
Figura 33 - Deslocamento e velocidade das massas não suspensas para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	62
Figura 34 - Deformação e velocidade de deformação das molas para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	62

Figura 35 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	63
Figura 36 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	64
Figura 37 - Deslocamento e velocidade das massas não suspensas para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	64
Figura 38 - Deformação e velocidade de deformação das molas para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	65
Figura 39 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de carro completo	67
Figura 40 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de carro completo.....	68
Figura 41 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de carro completo.....	68
Figura 42 - Deslocamento e velocidade das rodas dianteiras para condição inicial não nula para o modelo de carro completo	69
Figura 43 - Deslocamento e velocidade das rodas traseiras para condição inicial não nula para o modelo de carro completo	69
Figura 44 - Deformação e velocidade de deformação das molas dianteiras para condição inicial não nula para o modelo de carro completo.....	70
Figura 45 - Deformação e velocidade de deformação das molas traseiras para condição inicial não nula para o modelo de carro completo.....	70
Figura 46 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	71
Figura 47 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	72
Figura 48 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	72
Figura 49 - Deslocamento e velocidade das rodas dianteiras para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	73
Figura 50 - Deslocamento e velocidade das rodas traseiras para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	73

Figura 51 - Deformação e velocidade de deformação das molas dianteiras para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	74
Figura 52 - Deformação e velocidade de deformação das molas traseiras para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	74
Figura 53 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	75
Figura 54 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	76
Figura 55 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	76
Figura 56 - Deslocamento e velocidade das rodas dianteiras para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	77
Figura 57 - Deslocamento e velocidade das rodas traseiras para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo	77
Figura 58 - Deformação e velocidade de deformação das molas dianteiras para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	78
Figura 59 - Deformação e velocidade de deformação das molas traseiras para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	78
Figura 60 - Modelo de $\frac{1}{4}$ de carro controlado. Adaptado de (Junior, 2006; Barbosa, 2011)	84
Figura 61 - Modelo de $\frac{1}{2}$ carro controlado. Adaptado de (Bayrakdar, 2010).....	86
Figura 62 - Modelo de $\frac{1}{2}$ carro controlado. Adaptado de (Bayrakdar, 2010).....	88
Figura 63 - Exemplo de perfil de elevação para uma estrada classe A.....	89
Figura 62 - Exemplo de perfil de elevação para uma estrada classe D.....	90
Figura 63 - Exemplo de perfil de elevação para uma estrada classe G.....	90
Figura 64 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	93
Figura 65 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	93

Figura 66 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	94
Figura 67 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	95
Figura 68 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	95
Figura 69 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	96
Figura 70 - Perfil de elevação da estrada classe A usada na simulação de $\frac{1}{4}$ de carro	97
Figura 71 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	97
Figura 72 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	98
Figura 73 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	98
Figura 74 - Perfil de elevação da estrada classe D usada na simulação de $\frac{1}{4}$ de carro	100
Figura 75 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	100
Figura 76 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	101

Figura 77 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	101
Figura 78 - Perfil de elevação da estrada classe G usada na simulação de $\frac{1}{4}$ de carro	103
Figura 79 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	103
Figura 80 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	104
Figura 81 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	104
Figura 82 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	106
Figura 83 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	106
Figura 84 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	107
Figura 85 - Comparação das deflexões das molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	107
Figura 86 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	108
Figura 87 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	109

Figura 88 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	109
Figura 89 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	110
Figura 90 - Perfil de elevação da estrada classe A usada na simulação de $\frac{1}{2}$ carro.	111
Figura 91 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	111
Figura 92 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	112
Figura 93 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	112
Figura 94 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	113
Figura 95 - Perfil de elevação da estrada classe D usada na simulação de $\frac{1}{2}$ carro.	114
Figura 96 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	115
Figura 97 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	115
Figura 98 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	116
Figura 99 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	116

Figura 100 - Perfil de elevação da estrada classe G usada na simulação de $\frac{1}{2}$ carro	118
Figura 101 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	118
Figura 102 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	119
Figura 103 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	119
Figura 104 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	120
Figura 105 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo.....	122
Figura 106 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	122
Figura 107 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	123
Figura 108 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo.....	123
Figura 109 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo.....	124
Figura 110 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo carro completo.....	124

Figura 111 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo carro completo.....	125
Figura 112 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	126
Figura 113 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo	126
Figura 114 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo.....	127
Figura 115 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo	128
Figura 116 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	128
Figura 117 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	129
Figura 118 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	129
Figura 119 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	130
Figura 120 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo carro completo.....	130
Figura 121 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo carro completo.....	131

Figura 122 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	132
Figura 123 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo	132
Figura 124 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo.....	133
Figura 125 - Perfil de elevação da estrada classe A usada na simulação de carro completo.....	134
Figura 126 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo.....	134
Figura 127 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo.....	135
Figura 128 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo.....	135
Figura 129 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo.....	136
Figura 130 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo.....	136
Figura 131 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo carro completo.....	137
Figura 132 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo carro completo.....	137

Figura 133 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo	138
Figura 134 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo	139
Figura 135 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo.....	139
Figura 136 - Comparação da aceleração vertical do motorista em função da frequência para uma estrada perfil A	141
Figura 137 - Perfil de elevação da estrada classe D usada na simulação de carro completo.....	142
Figura 138 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo.....	142
Figura 139 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo.....	143
Figura 140 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo.....	143
Figura 141 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo.....	144
Figura 142 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo.....	144
Figura 143 - Comparação das deflexões das molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo carro completo.....	145

Figura 144 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo carro completo.....	145
Figura 145 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo	146
Figura 146 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo	147
Figura 147 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo.....	147
Figura 148 - Comparação da aceleração vertical do motorista em função da frequência para uma estrada perfil D	149
Figura 149 - Perfil de elevação da estrada classe G usada na simulação de carro completo.....	150
Figura 150 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo.....	150
Figura 151 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo.....	151
Figura 152 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo.....	151
Figura 153 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo.....	152
Figura 154 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo.....	152

Figura 155 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo carro completo.....	153
Figura 156 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo carro completo.....	153
Figura 157 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo	154
Figura 158 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo	155
Figura 159 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo.....	155
Figura 160 - Comparação da aceleração vertical do motorista em função da frequência para uma estrada perfil G	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores padronizados para avaliação do conforto (ISO, 1997)	29
Tabela 2 - Valores de $G_{d\Omega 0}$ de acordo com a norma ISO 8608 (Agostinacchio, Ciampa, & Olita, 2014).....	35
Tabela 3 - Parâmetros da simulação do modelo de $\frac{1}{4}$ de carro (Türkay & Akçay, 2008)	50
Tabela 4 - Análise modal do sistema de $\frac{1}{4}$ de carro.....	56
Tabela 5 - Parâmetros da simulação do modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	57
Tabela 6 - Análise modal do sistema de $\frac{1}{2}$ carro	65
Tabela 7 - Parâmetros da simulação do modelo de carro completo.....	66
Tabela 8 - Análise modal do sistema do carro completo	79
Tabela 9 - Ponderação dos critérios na matriz de decisão	80
Tabela 10 - Matriz de decisão	81
Tabela 11 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	99
Tabela 12 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	102
Tabela 13 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	105
Tabela 14 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	113
Tabela 15 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	117
Tabela 16 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro	121
Tabela 17 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe A para vibração vertical para o modelo de carro completo.....	140
Tabela 18 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe A para vibração horizontal para o modelo de carro completo	140
Tabela 19 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe D para vibração vertical para o modelo de carro completo.....	148

Tabela 20 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe D para vibração horizontal para o modelo de carro completo	148
Tabela 21 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe G para vibração vertical para o modelo de carro completo.....	156
Tabela 22 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe G para vibração horizontal para o modelo de carro completo	156

SUMÁRIO

1	Introdução.....	18
2	Revisão bibliográfica.....	19
2.1	Sistema de suspensão	19
2.1.1	Sistema de suspensão passiva.....	19
2.1.2	Sistema de suspensão ativa.....	20
2.1.3	Sistema de suspensão semi-ativa.....	20
2.2	Modelagem.....	21
2.2.1	Modelo de $\frac{1}{4}$ de carro simples	21
2.2.2	Modelo de $\frac{1}{4}$ de carro com massa suspensa	22
2.2.3	Modelo de $\frac{1}{2}$ carro	23
2.2.4	Modelo do carro completo.....	24
2.3	Conforto	25
2.4	Sensores.....	29
2.5	Atuadores.....	31
2.6	Rugosidade da Pista	34
2.7	Observabilidade e Controlabilidade	36
2.8	Técnicas de Controle	37
2.8.1	LQG/LTR	37
2.8.2	LQR	38
2.8.3	PID.....	39
2.9	Observador de Estados.....	39
3	Materiais e Métodos.....	40
3.1	Modelagem matemática.....	40
3.1.1	Equacionamento do modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	41
3.1.2	Equacionamento do modelo de $\frac{1}{2}$ carro	42
3.1.3	Equacionamento do modelo de carro completo.....	45
3.2	Simulações dos modelos.....	49
3.2.1	Simulação do modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	50
3.2.2	Simulação do modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	57
3.2.3	Simulação do modelo de carro completo.....	66
3.3	Definição da técnica de controle.....	80
3.4	Técnica LQR.....	81

3.5	Observador de estados	82
3.6	Projeto do Controlador	83
3.6.1	Controlador para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro.....	83
3.6.2	Controlador para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	84
3.6.3	Controlador para o modelo de carro completo.....	86
3.7	Perfil de estrada.....	88
4	Resultados	92
4.1	Modelo de $\frac{1}{4}$ de carro	92
4.1.1	Entrada degrau	92
4.1.2	Entrada senoidal	94
4.1.3	Estrada classe A.....	96
4.1.4	Estrada classe D.....	99
4.1.5	Estrada classe G.....	102
4.2	Modelo de $\frac{1}{2}$ carro.....	105
4.2.1	Entrada degrau	105
4.2.2	Entrada Senoidal.....	108
4.2.3	Estrada classe A.....	110
4.2.4	Estrada classe D.....	114
4.2.5	Estrada classe G.....	117
4.3	Modelo de carro completo	121
4.3.1	Entrada degrau	121
4.3.2	Entrada senoidal defasada.....	127
4.3.3	Estrada classe A.....	133
4.3.4	Estrada classe D.....	141
4.3.5	Estrada classe G.....	149
5	Conclusões.....	158
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	158
6	Bibliografia	159
7	Anexo A - Matrizes.....	162
8	Anexo B - Código do programa.....	164

1 Introdução

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver modelar e projetar um sistema de controle de suspensão automobilística semi-ativa a fim de melhorar o conforto dos passageiros.

O sistema de suspensão do veículo é o principal responsável por garantir o conforto e a dirigibilidade. Os sistemas passivos de suspensão são desenvolvidos de modo a se obter um equilíbrio entre esses aspectos, mas apresentam limitações. Portanto, existem trabalhos desde o final da década de 60 que estudam o controle de mecanismos ativos e semi-ativos para aplicação em suspensão veicular, visando obter um melhor compromisso entre o conforto e a segurança (Türkay & Akçay, 2008) (Crivellaro, 2008).

Para o desenvolvimento desse projeto, será seguida a seguinte metodologia:

- Revisão da bibliografia pertinente ao assunto;
- Desenvolvimento de um modelo do sistema de suspensão do automóvel;
- Estudo dos distúrbios considerados;
- Estudo dos sensores e atuadores necessários para desenvolvimento do sistema de controle;
- Projeto do sistema de controle ótimo;
- Desenvolvimento de simulações numéricas para validação dos modelos e do sistema de controle.

2 Revisão bibliográfica

O presente item tem como objetivo apresentar informações coletadas na revisão bibliográfica sobre temas relacionados ao desenvolvimento do trabalho.

2.1 Sistema de suspensão

O sistema de suspensão veicular consiste no mecanismo que conecta o veículo às suas rodas. Ele deve apresentar algumas funções principais:

- Absorver vibrações e choques de modo a isolar os passageiros e a carga;
- Sustentar o peso próprio do veículo;
- Garantir estabilidade lateral e longitudinal, além de resistência ao rolamento;
- Garantir a dirigibilidade do veículo, mantendo os pneus sempre em contato com a via.

Para desenvolver essas funções são impostos requisitos conflitantes para o sistema de suspensão, ou seja, uma suspensão que absorve melhor as vibrações e garante mais conforto é menos estável. Desse modo, o projeto deve desenvolver uma solução de compromisso, priorizando os aspectos mais importantes para o tipo de veículo no qual a suspensão deve ser instalada. Por exemplo, priorizando o conforto para veículos de passeio e a estabilidade para veículos esportivos. (Crivellaro, 2008)

Para o desenvolvimento da sua função o sistema de suspensão pode ser passivo, ativo ou semi-ativo. Nos itens a seguir, há uma breve descrição e uma análise desses tipos de sistema.

2.1.1 Sistema de suspensão passiva

O sistema de suspensão passiva é formado por um elemento capaz de armazenar energia (mola) e um elemento dissipativo (amortecedor) (Darus, 2008). No entanto, os parâmetros que determinam o funcionamento desses elementos são previamente estabelecidos, de modo que não é possível condicionar sua resposta à excitação recebida e, portanto, ele é dito passivo.

O sistema de suspensão passiva é amplamente aplicado na indústria automobilística devido a sua simplicidade, baixo custo e confiabilidade. Desse modo, ele garante uma boa relação entre seu custo e o cumprimento de suas funções.

Como já foi citado anteriormente, o sistema passivo não é capaz de se adaptar ao distúrbio a que é submetido, mas ele pode melhorar as características de sua resposta a partir da utilização de não-linearidades nas molas e amortecedores. Exemplos dessas não-linearidades aplicadas aos amortecedores são os diferentes coeficientes de amortecimento empregados na distensão e na compressão, além da variação desses coeficientes com a velocidade. As molas também apresentam rigidez variável com a sua compressão (Crivellaro, 2008).

2.1.2 Sistema de suspensão ativa

O sistema de suspensão ativa possui um atuador capaz de injetar ou retirar energia do sistema. Ou seja, a partir de medições feitas por sensores instalados na carroceria do automóvel ou no próprio sistema é feita a realimentação de um sistema de malha fechada, cujo controlador eletrônico comanda a resposta do atuador. Assim, o sistema é capaz de gerar forças variáveis e condicionar a resposta ao que for desejado.

Este tipo de sistema requer altas potências para seu funcionamento, o que dificulta muito sua implementação na indústria automotiva, uma vez que a autonomia dos veículos é um critério importante. Além disso, outra desvantagem é o custo elevado desse tipo de mecanismo, tanto para sua implantação quanto para sua manutenção. Outro ponto a se considerar é que o aumento do número de elementos constituintes do sistema aumenta sua complexidade e diminui sua confiabilidade o que é um ponto crítico desses sistemas, uma vez que sua falha pode provocar a desestabilização de todo o automóvel e provocar graves acidentes (Crivellaro, 2008).

2.1.3 Sistema de suspensão semi-ativa

O sistema de suspensão semi-ativa consiste em um mecanismo capaz de variar a taxa de dissipação de energia pela suspensão a partir do controle dos amortecedores.

Este tipo de sistema já possui algumas aplicações na indústria automotiva, principalmente em carros de luxo pois ele consegue combinar características

desejáveis dos dois sistemas anteriores. Os sistemas semi-ativos são mais baratos, menos complexos e mais confiáveis que os ativos. Além disso, eles consomem menos potência.

Não é possível obter o mesmo controle que o sistema ativo, no entanto, ele consegue uma saída mais adequada que o sistema passivo sem acrescentar muitas dificuldades construtivas ao projeto da suspensão (Crivellaro, 2008).

Na Figura 1 é possível ver representações esquemáticas dos três tipos de sistema citados: o passivo, o ativo e o semi-ativo.

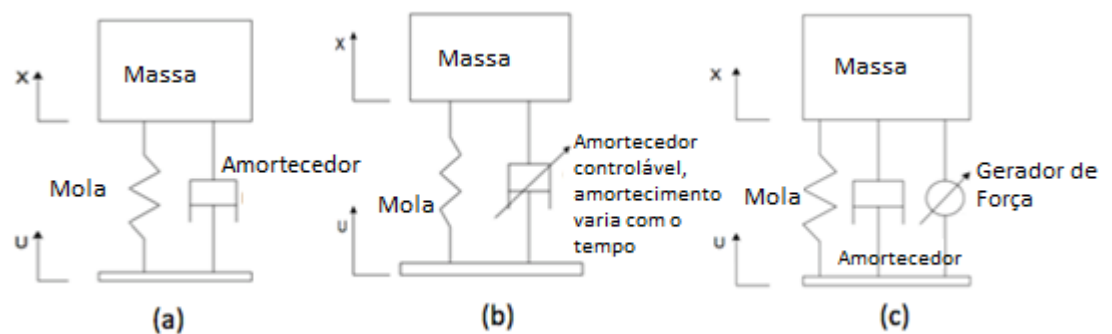


Figura 1 - Representações esquemáticas dos sistemas passivo (a), semi-ativo (b) e ativo (c). Adaptado de (Darus, 2008)

Baseado na análise apresentada, o tipo de sistema escolhido para o desenvolvimento do projeto de controle foi o de um sistema semi-ativo.

2.2 Modelagem

A modelagem do sistema de suspensão veicular apresenta duas variáveis: avaliação ou não do pneu e o (Bayrakdar, 2010) número de graus de liberdade do sistema considerados.

2.2.1 Modelo de ¼ de carro simples

Esse modelo consiste na representação de ¼ do carro. São representados a massa suspensa do veículo e seu sistema de suspensão, que é composto por um amortecedor e uma mola, com um grau de liberdade.

Este modelo é demasiadamente simples e é usado para uma abordagem inicial e para o início de compreensão do problema. Um esquema desse sistema pode ser visto na Figura 2 (Crivellaro, 2008).

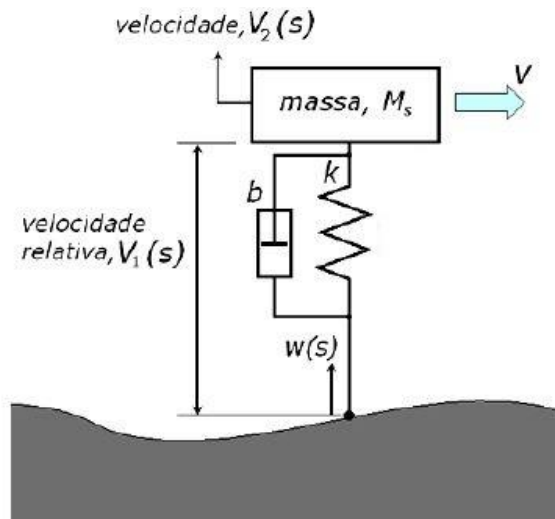


Figura 2 - Modelo de ¼ de carro simples (Crivellaro, 2008)

Nesse sistema, k é a constante elástica da mola, b é a constante de amortecimento do amortecedor, V é a velocidade horizontal do veículo, M_s é a massa suspensa de um quarto do veículo, V_2 é a velocidade da massa suspensa do veículo, V_1 é a velocidade relativa da massa suspensa em relação ao solo e w é a entrada de velocidade vertical que o pavimento aplica ao pneu.

Nota-se nesse modelo que tanto a massa da roda quanto o amortecimento e o coeficiente de restituição elástica do pneu são desprezados.

Pode-se avaliar que esse sistema é extremamente simples, e graças a isso é usualmente utilizado para uma abordagem inicial do problema, porém quando se deseja aprofundar no assunto, é necessário modelos mais complexos e mais próximos dos reais.

2.2.2 Modelo de ¼ de carro com massa suspensa

Esse modelo é semelhante ao modelo anterior, porém são adotados dois graus de liberdade, uma vez que é levada em consideração uma massa não suspensa, que seria equivalente a massa do sistema da roda do veículo. São adotados também sistemas de amortecimento e restituição elástica referentes ao pneu.

Um esquema desse modelo está na Figura 3.

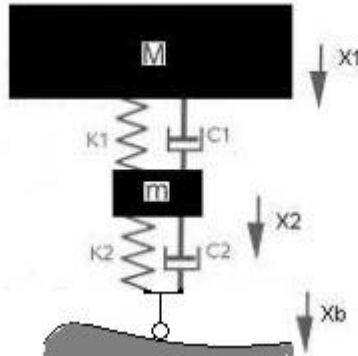


Figura 3 - Modelo de ¼ de carro com massa suspensa (Junior, 2006)

Nesse caso, M refere-se a massa suspensa do veículo, k_1 é a constante elástica da mola presente na suspensão, c_1 é o coeficiente de amortecimento do amortecedor, x_1 é a posição vertical da massa suspensa em um referencial inercial, m é a massa não suspensa do sistema (trata-se da massa da roda somada a massa do eixo do veículo), k_2 é a constante elástica do pneu, c_2 é o coeficiente de amortecimento pneu, x_2 é a posição vertical da massa não suspensa em um referencial inercial e x_b é a entrada, referente ao deslocamento do solo ou pista.

Esse modelo possui dois graus de liberdade, o primeiro diz respeito a movimentação da massa suspensa (veículo) e o outro em relação a massa não suspensa (roda).

Nota-se também que são consideradas as massas e as características do pneu, o que assim, acaba completado o modelo abordado anteriormente.

Esse modelo é mais completo que o anterior, porém mesmo assim possui algumas simplificações, uma vez que não contempla a geometria do sistema e não são inseridos todos os componentes presentes em um quarto de veículo. Além disso, este modelo aborda apenas movimentação na vertical, mostrando-se limitado.

2.2.3 Modelo de ½ carro

Como o modelo de ¼ de carro é insuficiente para uma análise precisa, é possível adotar um modelo de ½ carro baseado na simetria longitudinal e assim, por meio de uma geometria simples avaliar a arfagem (*pitch*) e a oscilação vertical do veículo.

Um esquema do modelo que exemplifica esse tipo de abordagem, pode ser visto na Figura 4.

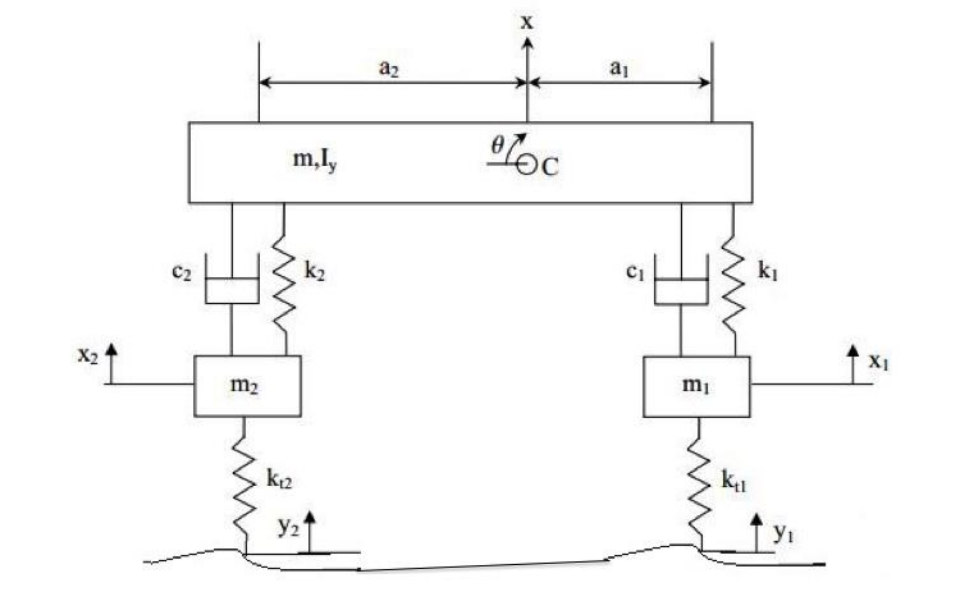


Figura 4 - Modelo de 1/2 carro. Adaptado de (Bayrakdar, 2010)

Nesse caso, as constantes m_1 e m_2 representam as massas não suspensas, k_1 e k_2 as constantes elásticas da mola da suspensão, c_1 e c_2 as constantes de amortecimento de cada amortecedor, x_1 e x_2 os deslocamentos das massas não suspensas em um referencial não inercial, k_{t1} e k_{t2} as constantes elásticas dos pneus, a_1 e a_2 a distância do centro de massa do veículo até os eixos, y_1 e y_2 as entradas de deslocamento vertical do solo, m e I_y as inércias do veículo, C o centro de massa do veículo, x o deslocamento do veículo em relação a um referencial inercial e Θ o ângulo de arfagem do veículo.

Esse tipo de modelagem matemática é simples e, portanto tem seu uso difundido quando se deseja avaliar o comportamento veicular a excitações externas.

Nota-se que esse modelo possui quatro graus de liberdade.

2.2.4 Modelo do carro completo

Para uma representação mais próxima da realidade, pode-se adotar um modelo de veículo com todos os graus de liberdade para a avaliação de suas respostas em sete graus de liberdade (Darus, 2008) (Junior, 2006).

Um esquema do modelo que exemplifica esse tipo de abordagem, pode ser visto na Figura 5.

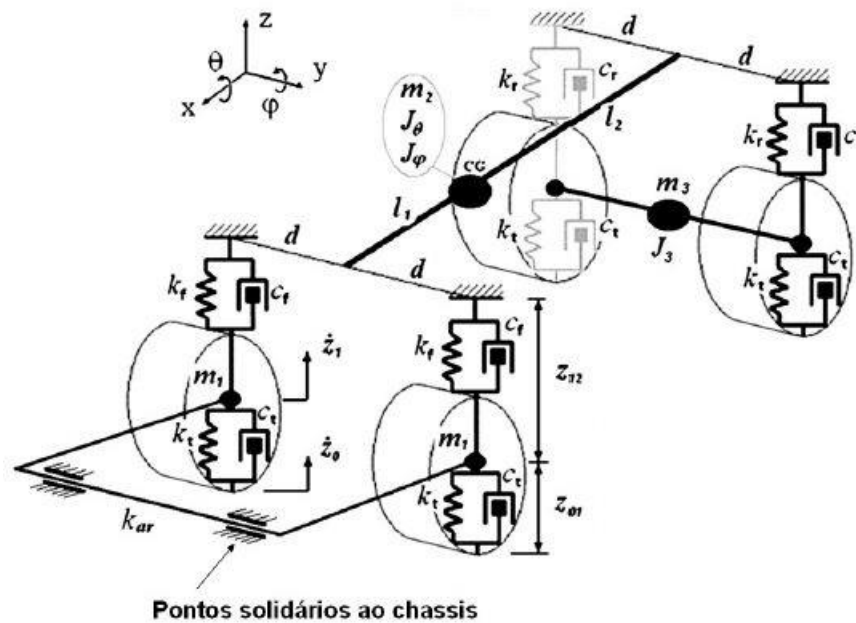


Figura 5 - Modelo do carro completo (Crivellaro, 2008)

Nota-se nesse tipo de abordagem que o sistema de suspensão está disposto na forma completa, sendo que é possível, através de uma abordagem relativamente simples, quando comparada a dinâmica de um veículo real, obter resultados satisfatórios para obtenção de parâmetros de rolagem, arfagem e de deslocamentos verticais do veículo.

2.3 Conforto

Um dos aspectos importantes no projeto de um sistema de suspensão e o objetivo desse trabalho é o aumento do conforto dos passageiros em veículos automotivos.

Os veículos estão sujeitos a diversos tipos de distúrbios como as irregularidades do pavimento, e acelerações geradas em manobras como frenagem e curvas (Crivellaro, 2008). Além disso, rajadas de vento e a própria vibração do motor

podem gerar ruídos e acelerações que causem desconforto nos passageiros (Junior, 2006) (Belgacem, Berry, & Masson, 2012).

Dentre esses distúrbios mencionados, o que mais prejudica o conforto é a vibração gerada pelo pavimento. Principalmente quando o veículo é sujeito a trancos (“jerk”), que são uma variação abrupta de aceleração.

Dados esses aspectos, é importante determinar alguma maneira de avaliar o conforto. No entanto, essa avaliação é bastante subjetiva. Existem normas com a ISO 2631 e SAE J1490, mas esses valores devem ser apenas um ponto de partida da avaliação (Crivellaro, 2008).

A avaliação do conforto pode ser feita por meio do valor eficaz (RMS – Root Mean Square) do sinal de aceleração a que os passageiros são expostos. Essa medida leva em conta a cronologia do sinal e considera um valor de amplitude proporcional à energia do sinal, indicando o poder agressivo da vibração (Regazzi & Ximenes, 2000). A norma ISO 2631, traz valores sobre a fadiga sentida pelo corpo humano exposto a vibrações, considerando a frequência e a direção da vibração e o tempo de exposição (ISO, 1978). A Figura 6 mostra as direções de medida da vibração no corpo humano e a Figura 7 traz os limites de exposição, fadiga e conforto para vibração de acordo com a norma ISO 2631.

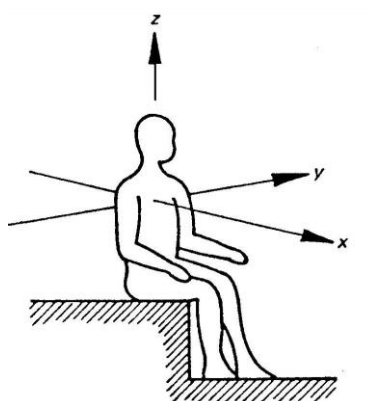


Figura 6 - Direções de medida da vibração no corpo humano (ISO, 1978)

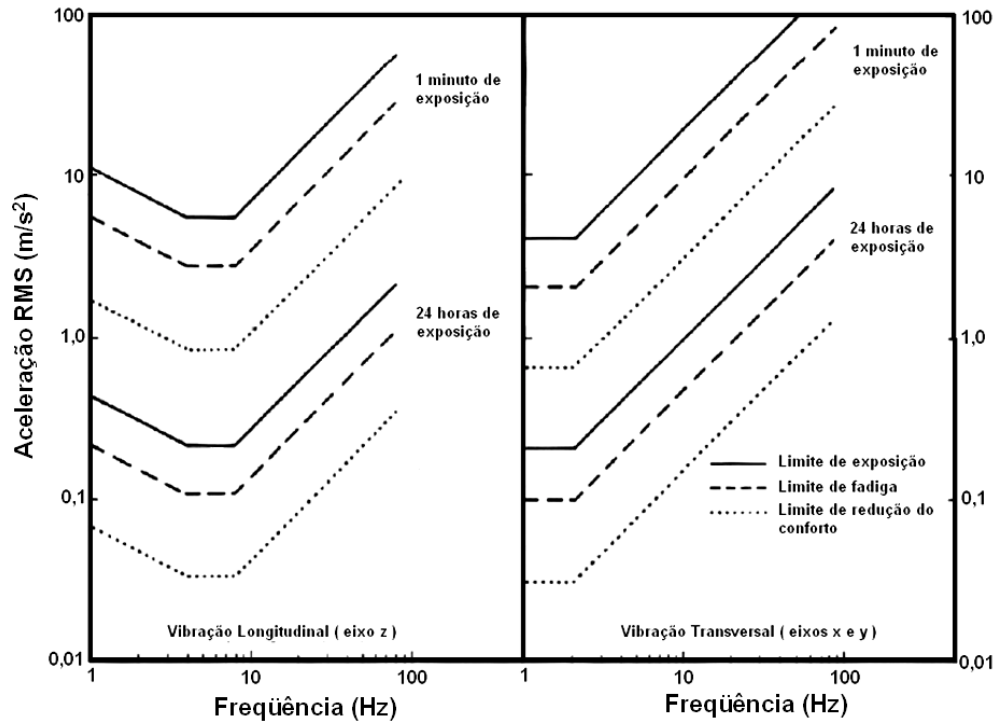


Figura 7 - Limite de exposição, fadiga e conforto para 1 minuto e 24 horas de exposição à vibração no corpo humano de acordo com a norma ISO 2631 (ISO, 1978)

Percebe-se da Figura 7, que a faixa mais crítica para vibração longitudinal é de 4 a 8 Hz e para vibração transversal de 1 a 2 Hz.

Além dos limites de exposição do corpo humano a vibração, a norma ISO 2631 de 1997 traz uma metodologia para medir e avaliar sinais de vibração (ISO, 1997). A técnica consiste em calcular o valor eficaz da aceleração ponderada por fatores que variam com a frequência da excitação. A expressão (2.1) mostra como o valor eficaz é calculado, onde a_w é o sinal de aceleração ponderado pelos fatores da Figura 8 e T é a duração da medição.

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

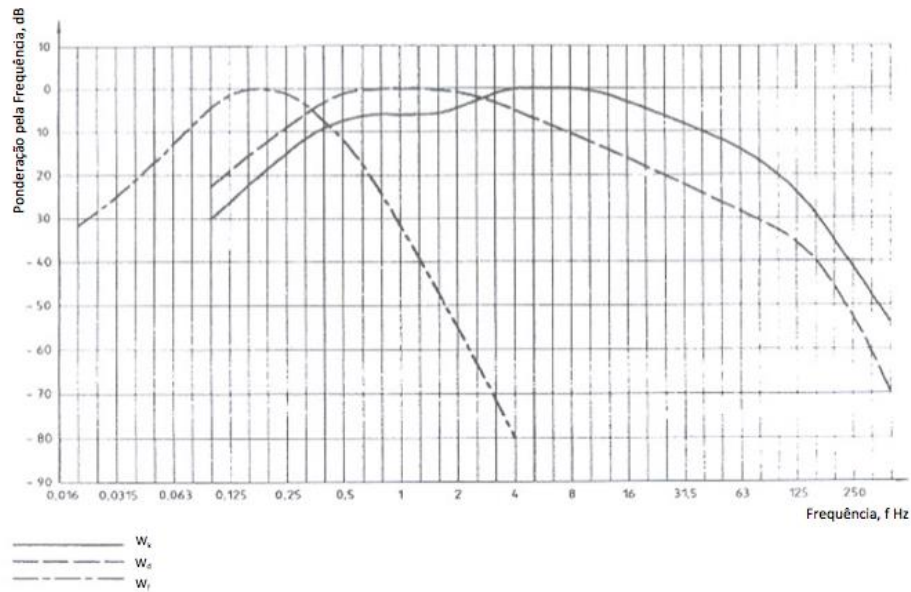


Figura 8 - Fatores de ponderação do sinal de aceleração de acordo com a frequência de excitação. Adaptado de (ISO, 1997)

Em alguns casos, a avaliação convencional pela expressão (2.1) não é suficiente. Para avaliar trancos e vibrações transientes, divide-se o sinal em intervalos menores e então adota-se o máximo dos vários intervalos como MTVV (Maximum Transient Vibration Value). Esse método é descrito nas expressões (2.2) e (2.3).

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

$$MTVV = \max[a_w(t_0)] \quad (2.3)$$

Além desse método, existe o método da quarta potência, que é mais sensível a valores de pico. Esse método é descrito na expressão (2.4).

$$VDV = \left[\int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{1/4} \quad (2.4)$$

A norma padroniza alguns valores para então comparar os valores eficazes obtidos e avaliar o conforto. A Tabela 1 traz esses valores.

Tabela 1 - Valores padronizados para avaliação do conforto (ISO, 1997)

Valor da aceleração	Avaliação do conforto
Menor que $0,315 \text{ m/s}^2$	Não desconfortável
Entre $0,315$ e $0,63 \text{ m/s}^2$	Pouco desconfortável
Entre $0,5$ e 1 m/s^2	Razoavelmente desconfortável
Entre $0,8$ e $1,6 \text{ m/s}^2$	Desconfortável
Entre $1,25$ e $2,5 \text{ m/s}^2$	Muito desconfortável
Maior que 2 m/s^2	Extremamente desconfortável

2.4 Sensores

Para o projeto de um sistema de controle por realimentação é necessário medir os estados. O ideal seria medir todos os estados com sensor, no entanto isso não é viável devido ao custo e também devido a restrições técnicas, uma vez que algumas medidas são muito difíceis de se realizar, como a deformação do pneu. A Figura 9 mostra as grandezas que devem ser medidas para cada tipo de projeto de suspensão.

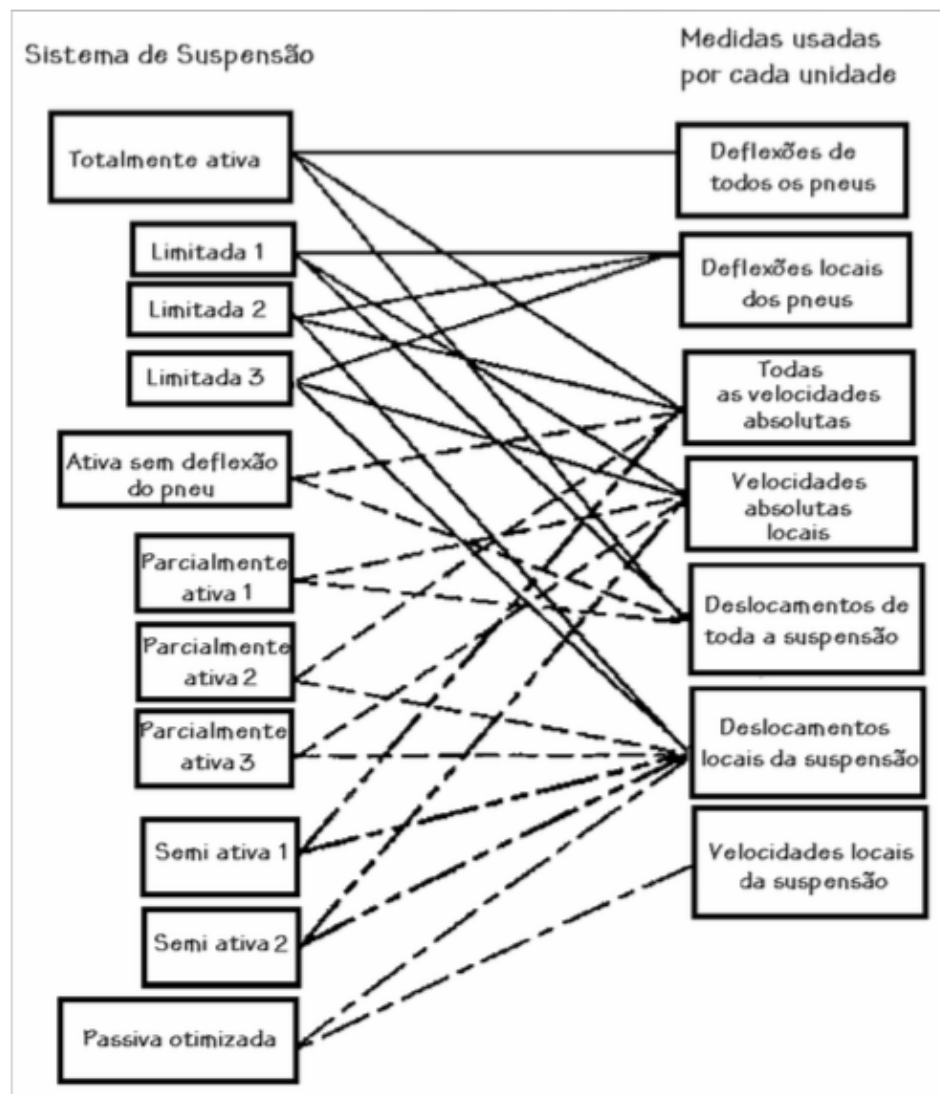


Figura 9 - Tipos de suspensão relacionados às grandezas que devem ser medidas (Ferreira, 2003)

Para o sensoriamento de movimentos de sistemas mecânicos costuma-se utilizar acelerômetros. Atualmente, estão disseminados os sensores chamados MEMS (“Micro-Electro-Mechanical Systems”), que são acelerômetros inseridos em circuitos integrados. Esses sensores são mais baratos que os acelerômetros que utilizam cristais piezelétricos, são confiáveis e apresentam uma resposta suficientemente rápida (Silicon Desingns Inc., 2011) (Crivellaro, 2008).

Para a medição de deslocamento existem diversos tipos de sensores como os encoders, os potenciômetros e os magneto-indutivos. Os potenciômetros não são uma boa opção para o uso em suspensões, apesar de seu baixa custo e robustez, por

apresentar contato mecânico e atrito entre as partes, desgastando rapidamente. Os encoders não apresentam contato mecânico, possuindo durabilidade e robustez, no entanto, os sensores magneto-indutivos são os mais indicados, pois são bastante precisos, robustos e facilmente instalados (Balluff, 2015) (Crivellaro, 2008).

Para a medição de forças os sensores disponíveis são células de carga e extensômetros. No entanto, esses sensores não são adequados para aplicação em sistemas de suspensão, precisando ser estimados (Crivellaro, 2008).

Na Figura 10 é possível ver o sensor de deslocamento instalado entre a carroceria e a roda na suspensão dianteira de um Corvette.



Figura 10 - Sensor de deslocamento na suspensão dianteira de um Corvette. (Crivellaro, 2008)

2.5 Atuadores

Os sistemas de suspensão semi-ativa atuam no veículo a partir da variação da taxa de dissipação de energia nos amortecedores. As maneiras conhecidas para realizar essa tarefa são o uso de mecanismos que restrinjam a vazão do fluido dentro do amortecedor ou então a partir da utilização de fluidos magneto-reológicos.

A restrição da vazão de fluido no interior de amortecedores e assim, variação do coeficiente de amortecimento é feito pela alteração do diâmetro de passagem do fluido, utilizando válvulas eletromagnéticas ou eletromecânicas. Os fluidos magneto-reológicos consistem em fluidos que alteram sua capacidade de transporte de

quantidade de movimento, devido à polarização de partículas ferromagnéticas suspensas por meio de um campo magnético (Imaduddin, Mazlan, & Zamzuri, 2013).

Os fluidos magneto-reológicos apresentam vantagens em relação às válvulas e costumam ser o sistema mais usado nesse tipo de aplicação. Dentre as vantagens destacam-se: maior velocidade de resposta (menos de 10 ms), maior robustez, menor suscetibilidade a desgaste e falha e consumo de energia compatível com a aplicação automobilística (opera com tensões compatíveis com a bateria de 12V e necessita de potência da ordem de 20 a 50 W) (Imaduddin, Mazlan, & Zamzuri, 2013) (Crivellaro, 2008).

Os fluidos magneto-reológicos são compostos por um pó magnético suspenso em um óleo com aditivos estabilizantes e para retardo da sedimentação do pó. O material ferromagnético deve possuir alta magnetização de saturação, baixa coercividade, alta permeabilidade inicial e baixas perdas magnéticas por histerese. O fluido magneto-reológico deve ter alta viscosidade aparente para ter bom desempenho e deve ter alta estabilidade e durabilidade (Crivellaro, 2008).

Além do fluido magneto-reológico, a válvula magnética também tem grande influência no comportamento do amortecedor. Um exemplo desse tipo de válvula pode ser visto na Figura 11.

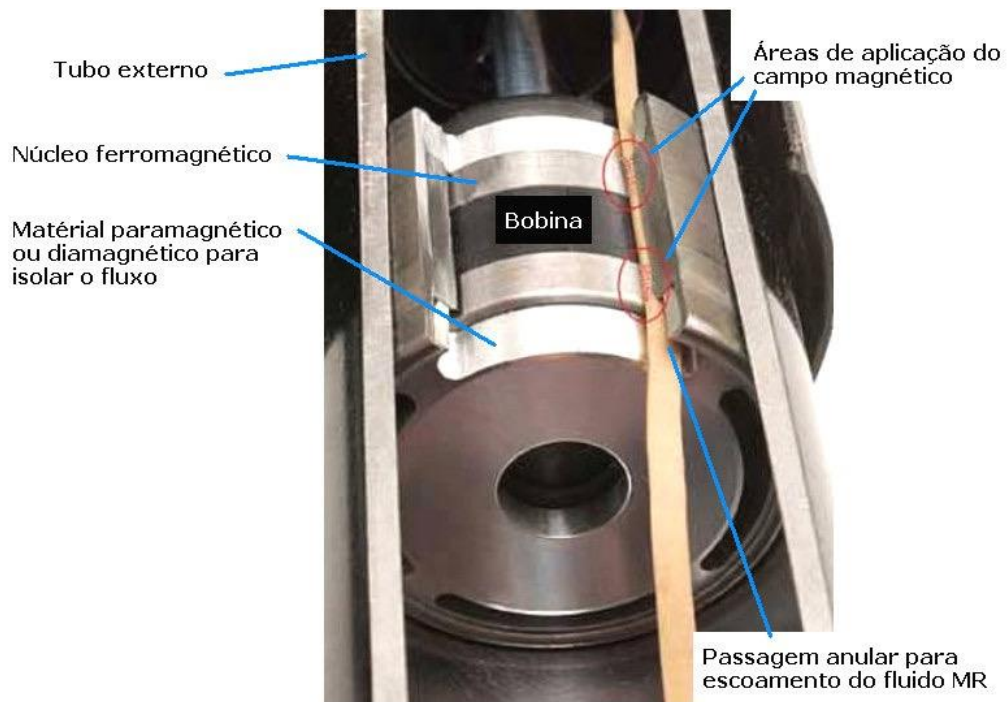


Figura 11 - Válvula magneto-reológica usada no Corvette (Crivellaro, 2008)

Existem modelos para representar a dinâmica dos atuadores magneto-reológicos. Destaca-se o modelo de Bouc-Wen (Wen, 1976) representado na Figura 12.

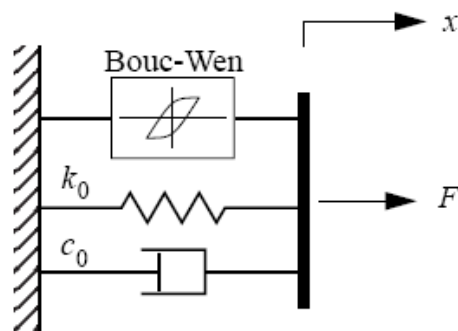


Figura 12 - Modelo Bouc-Wen de um amortecedor magneto-reológico (Crivellaro, 2008).

A força neste modelo é dada pela equação (2.5).

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (2.5)$$

z é uma variável evolucionária que é responsável pelo comportamento histerético e é governada pela equação (2.6):

$$\dot{z} = -\gamma \cdot |\dot{x}| \cdot z \cdot |z|^{n-1} - \beta \cdot \dot{x} \cdot |z|^n + A \cdot \dot{x} \quad (2.6)$$

onde γ , β , A e n são parâmetros que controlam a forma da transição da curva de histerese.

2.6 Rugosidade da Pista

Existem algumas formas de excitação do veículo, entre elas pode-se citar como uma das principais a rugosidade da estrada que o mesmo percorre. Essa rugosidade pode ter um impacto sério na dinâmica e estabilidade do veículo, podendo alterar o seu movimento (Randriatefison, 2011; Mathworks, 2012).

A rugosidade do pavimento pode ser descrita como a elevação de um perfil pelo qual as rodas do veículo percorrem, isso age como um deslocamento vertical para cada roda do veículo. (Gillespie, 1992)

Para analisar a resposta do veículo a um perfil de estrada é necessário elaborar tanto um modelo matemático para o veículo como um modelo para a estrada. Existem alguns métodos conhecidos para descrever e avaliar a rugosidade de uma estrada, tais como o perfil unidimensional da estrada e o perfil tridimensional da estrada. Entretanto, é possível abordar o perfil como sendo um sinal e assim adotar um tratamento estatístico do mesmo, assim, pode-se utilizar uma das representações entre as mais úteis para avaliar a rugosidade de uma estrada que é chamada de Densidade Espectral de Potência (em inglês Power Spectral Density, conhecida pela sigla PSD) (Gillespie, 1992).

Essa análise é feita decompondo o perfil da estrada pela Transformada de Fourier em uma série de ondas senoidais variando a sua fase e amplitude. O gráfico dessas amplitudes em função da frequência espacial é o chamado PSD. Entretanto, com isso seria obtido um perfil de posições, e para um tratamento mais adequado dos dados, seria conveniente avaliar a sua aceleração. A aceleração produzida seria resultado do perfil de posições sendo transformado em um deslocamento, para que assim fosse derivado duas vezes obtendo a sua aceleração (Gillespie, 1992).

Apesar do PSD de cada estrada ser único, algumas características são comuns e beneficiam uma busca otimizada pelo conforto dos integrantes do veículo. Para isso existe uma norma, a ISO 8608:1995, na qual estabiliza parâmetros para classificar estradas de acordo com uma classe estabelecida entre A e H. Essa norma estabelece parâmetros para cada classe de estrada que assim podem ser utilizadas como entrada para um estudo do comportamento veicular em uma pista genérica (Agostinacchio, Ciampa, & Olita, 2014). O perfil do PSD é dado pela expressão (2.7), onde Ω_0 é 1 rad/m e os valores de $G_d(\Omega_0)$ são tabelados pela norma ISO 8608 para cada classe. Os valores de $G_d(\Omega_0)$ são dados na Tabela 2.

$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-2} \quad (2.7)$$

Tabela 2 - Valores de $G_d(\Omega_0)$ de acordo com a norma ISO 8608 (Agostinacchio, Ciampa, & Olita, 2014)

$G_d(\Omega_0) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$		
	Limite Inferior	Limite Superior
A	-	2
B	2	8
C	8	32
D	32	128
E	128	512
F	512	2048
G	2048	8192
H	8192	-

Com o PSD do pavimento e o modelo veicular é possível elaborar uma resposta do sistema veicular quando exposto a estrada descrita no PSD elaborado. O Diagrama de blocos para esse tipo de resposta pode ser visto na Figura 13.

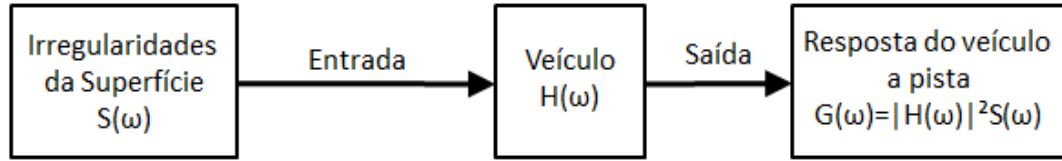


Figura 13 - Diagrama de Blocos do sistema. Adaptado de (Barbosa, 2011).

Sendo assim, é possível elaborar uma resposta do veículo e do sistema para um perfil de rodovia, tanto genérico, quanto específico.

Conhecendo a expressão do PSD é possível também gerar um perfil randômico de elevação de rodovia, dado pela expressão (2.8), onde φ_i é um ângulo de fase uniformemente distribuído.

$$h(x) = \sum_i^N \sqrt{2 \cdot G_d(\Omega_i) \cdot \Delta\Omega} \cdot \cos(\Omega_i \cdot x + \varphi_i) \quad (2.8)$$

2.7 Observabilidade e Controlabilidade

Observabilidade e Controlabilidade são dois conceitos importantes em projetos de sistema de controle.

Um sistema é dito controlável se é possível levá-lo de um estado inicial $x(t_0)$ para a origem $x(t_f)=0$ por um controle $u(t)$ num intervalo de tempo finito (t_0, t_f) . Para avaliar a controlabilidade de um sistema linear escrito em espaço de estados é construída a matriz de controlabilidade descrita em (2.9), onde n é o número de variáveis de estado e m é o número de variáveis controladas. Avalia-se o posto da matriz que deve ser igual a n . (Ogata, 1997)

$$\mathbb{C} = [B_{n \times m} \quad A_{n \times n} B_{n \times m} \quad A^2_{n \times n} B_{n \times m} \quad \dots \quad A^{n-1}_{n \times n} B_{n \times m}] \quad (2.9)$$

Um sistema é dito observável quando é possível estimar sua posição inicial a partir do histórico de medidas de estados e do histórico das entradas. Para avaliar a observabilidade de um sistema linear é construída a matriz de observabilidade

descrita em (2.10), onde n é o número de variáveis de estado e q é o número de variáveis medidas. Avalia-se o posto da matriz que deve ser igual a n .

$$\mathbb{O} = [C^T \ A^T C^T \ A^{T^2} C^T \ \dots \ A^{T^{n-1}} C^T] \quad (2.10)$$

Para alguns casos os métodos computacionais geram erros de arredondamento nos cálculos que fazem com que essa maneira de determinar a controlabilidade e observabilidade do sistema falhem. Assim, um outro método para avaliar esses conceitos é calculando o posto das matrizes de acordo com as equações (2.11) e (2.12). Onde A , B e C são as matrizes que descrevem o sistema em espaço de estados e λ é o vetor dos autovalores do sistema. (Paige, 1981)

$$\text{rank}(B - A - \lambda I) = n \quad (2.11)$$

$$\text{rank}(C^T - A^T - \lambda I) = n \quad (2.12)$$

2.8 Técnicas de Controle

Para desenvolver o projeto de controle existem diversas técnicas para sintonizar o controlador. Dentre essas foram abordadas:

- LQG/LTR
- LQR
- PID

2.8.1 LQG/LTR

A técnica LQG/LTR (“Linear Quadratic Gaussian”/“Loop Transfer Recovery”) é uma técnica de controle robusto aplicada a sistemas multivariáveis (MIMO) que se baseia em barreiras de desempenho, como mostra a Figura 14. Ela apresenta as seguintes características: (da Cruz, 1996)

- Controlador robusto em face de uma ampla classe de erros de modelagem é garantida pelo procedimento;

- A técnica foi concebida para aplicação a sistemas multivariáveis;
- Procedimento de projeto é de natureza sistemática;
- A metodologia se baseia numa abordagem frequencial, aplicando-se assim a sistemas lineares invariantes no tempo;
- Número de parâmetros de projeto é relativamente pequeno;
- Existe software de apoio ao projeto disponível comercialmente.

No entanto, a técnica convencional não pode ser aplicada para sistemas de suspensão semi-ativa, de modo que o método aplicado se baseia na metodologia aperfeiçoada por (Crivellaro, 2008).

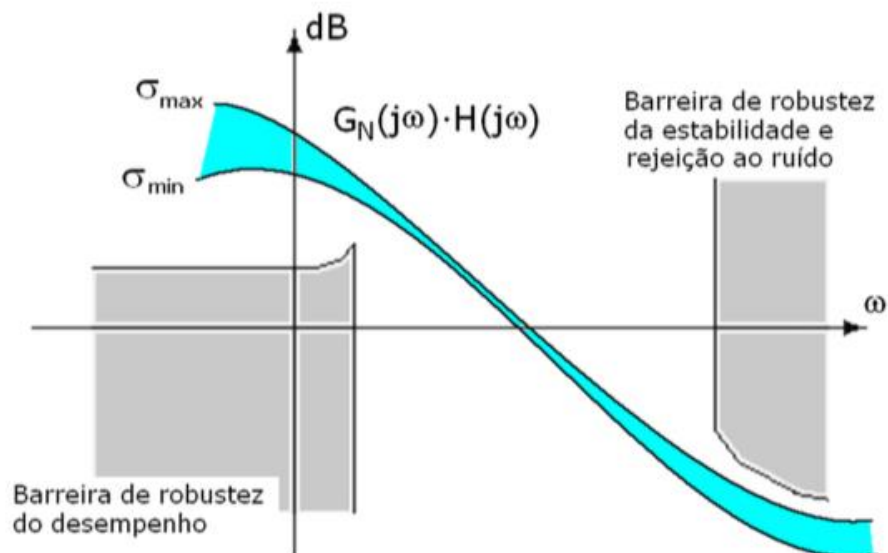


Figura 14 - Diagrama de Bode para estabilidade e desempenho robustos (Crivellaro, 2008)

2.8.2 LQR

A técnica LQR (“Linear Quadratic Regulator”) se baseia em determinar o controlador que minimiza a função objetivo quadrática (Ogata, 1997) (Anderson & Moore, 1989). Nessa técnica é possível ponderar seus fatores de modo a priorizar o desempenho ou o consumo de energia.

Essa técnica costuma ser aplicada em projetos de controladores para sistemas de suspensão ativa e semi-ativa. (Unger, Schimmack, Lohmann, & Schwarz, 2011)

(Taghirad & Esmailzadeh, 1997) (Kumar & Vijayarangan, 2006) (Meng, Chen, & He, 2014) (Shirahatt, Prasad, Panzade, & Kulkarni, 2008)

2.8.3 PID

A técnica do PID consiste em projetar um controlador no domínio da frequência composto por um ganho proporcional, um integrativo e um derivativo. O ganho integrativo reduz o erro em regime permanente e o erro derivativo reduz o tempo de resposta do sistema. (Ogata, 1997)

Este tipo de controlador pode ser sintonizado por diversas técnicas como: Ziegler-Nichols, Alocação de polos, Método do Lugar das Raízes e Método ITAE. (Ogata, 1997)

2.9 Observador de Estados

Um sistema controlado normalmente não tem todos os seus estados medidos por questões de viabilidade econômica ou técnica. Portanto, são utilizados observadores de estado, que são algoritmos colocados na malha de realimentação, que estimam as variáveis de estados a partir das variáveis medidas (Ogata, 1997).

Os observadores de estados podem ser de ordem mínima ou observadores plenos. No primeiro caso, são estimadas apenas as variáveis não medidas. No segundo, todas as variáveis são estimadas com base nas medições (Ogata, 1997).

3 Materiais e Métodos

A metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho será:

- Desenvolvimento do modelo matemático das equações de movimento do veículo e seu sistema de suspensão a partir da aplicação dos Teoremas e do Movimento do Baricentro (T.M.B.) e do Movimento Angular (T.M.A.) (França & Matsumura, 2001) e das equações de Euler-Lagrange (Sanchez, 2007);
- Simulação de algumas entradas para avaliação do sistema;
- Definição da técnica de controle aplicada
- Projeto do sistema de controle;
- Simulação do sistema controlado;
- Comparação dos resultados.

3.1 Modelagem matemática

Foram desenvolvidos os equacionamentos dos modelos descritos nos itens 2.2.2 a 2.2.4. Para tanto foram adotados sistemas de referência e foram aplicados os Teoremas do Movimento do Baricentro (T.M.B.) e do Movimento Angular (T.M.A.).

Esse equacionamento está descrito nas seções seguintes do relatório. Vale ressaltar que a posição de equilíbrio da mola adotada para os sistemas é aquela na qual ela equilibra o peso, de modo que o peso não foi considerado no equacionamento.

Uma simplificação adotada para efetuar todos os equacionamentos é considerar as constantes elásticas das molas e os coeficientes dos amortecedores constantes. Nos veículos esses dispositivos são projetados de modo a variar, dependendo da sua condição de operação.

Outra hipótese adotada para o equacionamento é que a única fonte de distúrbios considerada no modelo foi a irregularidade do pavimento, de modo que outras fontes de vibração como ventos, curvas e a própria vibração do motor foram desprezadas.

Como forma de verificação também foi aplicado o equacionamento pelas equações de Euler-Lagrange, obtendo-se as mesmas equações do movimento.

3.1.1 Equacionamento do modelo de ¼ de carro

Tomando como base o sistema de referência descrito na Figura 15, foi aplicado o T.M.B. na massa M (chassi do automóvel) e na massa m (pneu). Obtendo as equações abaixo.

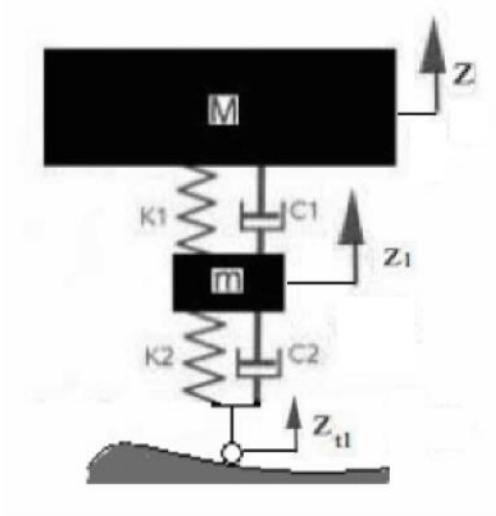


Figura 15 - Sistema de referência adotado para o modelo de ¼ de carro. Adaptado de (Junior, 2006; Barbosa, 2011)

$$M\ddot{z} = k_1(z_1 - z) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}) \quad (3.1)$$

$$m\ddot{z}_1 = k_2(z_{t1} - z_1) + c_2(\dot{z}_{t1} - \dot{z}_1) - k_1(z_1 - z) - c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}) \quad (3.2)$$

A partir das equações é possível escrever o sistema na forma de espaço de estados, ou seja:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.3)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.4)$$

Essa forma possibilita a simulação em software computacionais. Para esse caso, o vetor de estados x , o vetor de entradas u e as matrizes A , B , C e D estão descritas a seguir.

$$x = \begin{Bmatrix} z \\ \dot{z} \\ z_1 \\ \dot{z}_1 \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

$$u = \begin{Bmatrix} z_{t1} \\ \dot{z}_{t1} \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{M} & -\frac{c_1}{M} & \frac{k_1}{M} & \frac{c_1}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m} & \frac{c_1}{m} & -\frac{(k_1 + k_2)}{m} & -\frac{(c_1 + c_2)}{m} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_2}{m} & \frac{c_2}{m} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Foram desenvolvidas simulações para avaliar o modelo desenvolvido. Essas simulações estão presentes no item 3.2.1.

3.1.2 Equacionamento do modelo de ½ carro

Tomando como base o sistema de referência descrito na Figura 16, foi aplicado o T.M.B. na massa M (chassi do automóvel) e nas massas m_1 e m_2 (pneus), além do T.M.A. na massa M em relação ao polo C (centro de gravidade do veículo). Obtendo as equações abaixo .

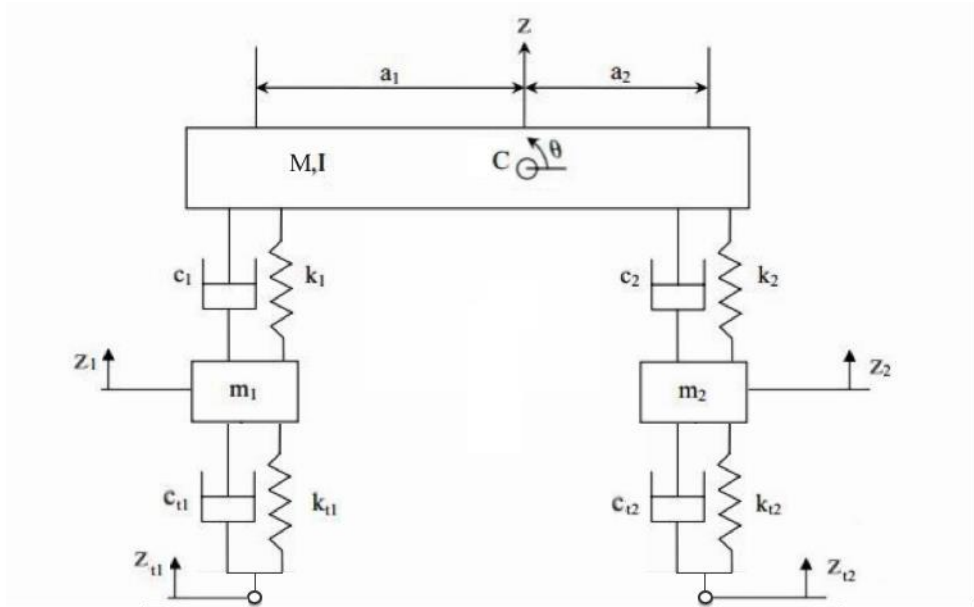


Figura 16 - Sistema de referência adotado para o modelo de ½ carro. Adaptado de (Bayrakdar, 2010)

$$M\ddot{z} = k_1(z_1 - z + a_1 \sin\theta) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z} + a_1 \cos\theta \dot{\theta}) + k_2(z_2 - z - a_2 \sin\theta) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z} - a_2 \cos\theta \dot{\theta}) \quad (3.9)$$

$$I\ddot{\theta} = -k_1 a_1 (z_1 - z + a_1 \sin\theta) - c_1 a_1 (\dot{z}_1 - \dot{z} + a_1 \cos\theta \dot{\theta}) + k_2 a_2 (z_2 - z - a_2 \sin\theta) + c_2 a_2 (\dot{z}_2 - \dot{z} - a_2 \cos\theta \dot{\theta}) \quad (3.10)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 = k_{t1}(z_{t1} - z_1) + c_{t1}(\dot{z}_{t1} - \dot{z}_1) - k_1(z_1 - z + a_1 \sin\theta) - c_1(\dot{z}_1 - \dot{z} + a_1 \cos\theta \dot{\theta}) \quad (3.11)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 = k_{t2}(z_{t2} - z_2) + c_{t2}(\dot{z}_{t2} - \dot{z}_2) - k_2(z_2 - z - a_2 \sin\theta) - c_2(\dot{z}_2 - \dot{z} - a_2 \cos\theta \dot{\theta}) \quad (3.12)$$

A fim de simplificar o equacionamento, foi feita a linearização para pequenos ângulos, ou seja:

$$\sin\theta \approx \theta \text{ e } \cos\theta \approx 1 \quad (3.13)$$

Assim as equações ficam:

$$\begin{aligned} M\ddot{z} = & k_1(z_1 - z + a_1\theta) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z} + a_1\dot{\theta}) \\ & + k_2(z_2 - z - a_2\theta) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z} - a_2\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} = & -k_1a_1(z_1 - z + a_1\theta) - c_1a_1(\dot{z}_1 - \dot{z} + a_1\dot{\theta}) \\ & + k_2a_2(z_2 - z - a_2\theta) + c_2a_2(\dot{z}_2 - \dot{z} - a_2\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} m_1\ddot{z}_1 = & k_{t1}(z_{t1} - z_1) + c_{t1}(\dot{z}_{t1} - \dot{z}_1) \\ & - k_1(z_1 - z + a_1\theta) - c_1(\dot{z}_1 - \dot{z} + a_1\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} m_2\ddot{z}_2 = & k_{t2}(z_{t2} - z_2) + c_{t2}(\dot{z}_{t2} - \dot{z}_2) \\ & - k_2(z_2 - z - a_2\theta) - c_2(\dot{z}_2 - \dot{z} - a_2\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

A partir das equações é possível escrever o sistema na forma de espaço de estados. Essa forma possibilita a simulação em software computacionais. Para esse caso, o vetor de estados x , o vetor de entradas u e as matrizes B , C e D estão descritas a seguir. A matriz A foi acrescentada no Anexo A para poder ser visualizada devido ao seu tamanho.

$$x = \begin{Bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ z_1 \\ \dot{z}_1 \\ z_2 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

$$u = \begin{Bmatrix} z_{t1} \\ \dot{z}_{t1} \\ z_{t2} \\ \dot{z}_{t2} \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{t1}}{m_1} & \frac{c_{t1}}{m_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_{t2}}{m_2} & \frac{k_{t2}}{m_2} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Foram desenvolvidas simulações para avaliar o modelo desenvolvido. Essas simulações estão presentes no item 3.2.2.

3.1.3 Equacionamento do modelo de carro completo

Tomando como base o sistema de referência descrito na Figura 17, foi aplicado o T.M.B. na massa M (chassi do automóvel) e nas massas m_1 a m_4 (pneus), além do T.M.A. na massa M em relação ao eixo x e ao eixo y. A fim de simplificar o equacionamento, as forças do sistema de suspensão serão descritas separadamente, ou seja, a força F_i corresponde à força aplicada pelo sistema de suspensão no chassi e na roda i (i=1,2,3 e 4). Além disso, as forças exercidas pelos pneus também serão descritas separadamente, ou seja, a força F_{ti} corresponde à força aplicada pelo pneu na roda i (i=1,2,3 e 4). Assim, as 4 primeiras equações abaixo descrevem as forças aplicadas ao chassi e as quatro últimas correspondem às forças as rodas.

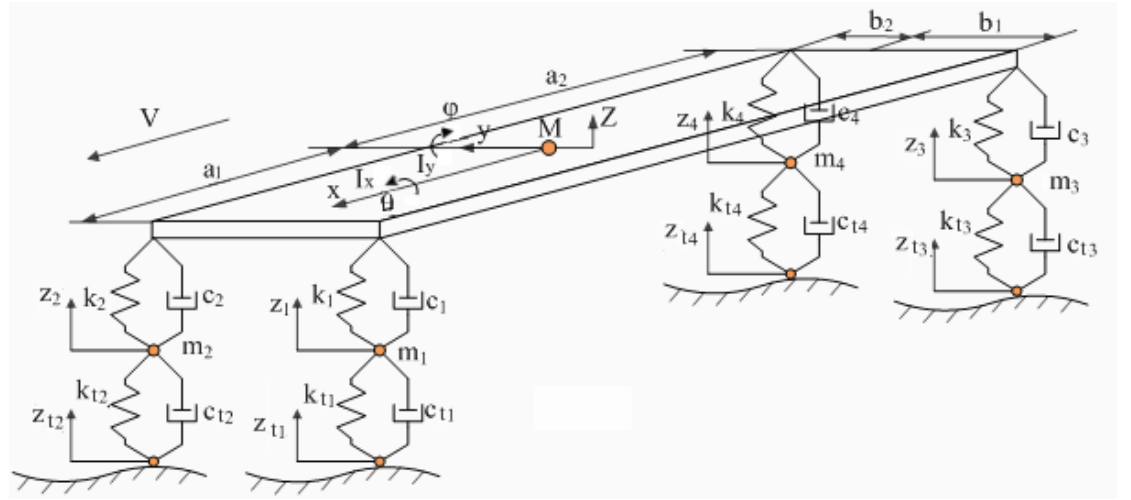


Figura 17 - Sistema de referência adotado para o modelo de carro completo. Adaptado de (Mathworks, 2012)

Para esse caso as equações já estão linearizadas para pequenos deslocamentos e portanto:

$$\sin\theta \approx \theta \text{ e } \cos\theta \approx 1 \quad (3.21)$$

$$F_1 = k_1(z_1 - z - b_1\theta - a_1\varphi) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z} - b_1\dot{\theta} - a_1\dot{\varphi}) \quad (3.22)$$

$$F_2 = k_2(z_2 - z + b_2\theta - a_1\varphi) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z} + b_2\dot{\theta} - a_1\dot{\varphi}) \quad (3.23)$$

$$F_3 = k_3(z_3 - z - b_1\theta + a_2\varphi) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z} - b_1\dot{\theta} + a_2\dot{\varphi}) \quad (3.24)$$

$$F_4 = k_4(z_4 - z + b_2\theta + a_2\varphi) + c_4(\dot{z}_4 - \dot{z} + b_2\dot{\theta} + a_2\dot{\varphi}) \quad (3.25)$$

$$F_{t1} = k_{t1}(z_{b1} - z_1) + c_1(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_1) \quad (3.26)$$

$$F_{t2} = k_{t2}(z_{b2} - z_2) + c_2(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_2) \quad (3.27)$$

$$F_{t3} = k_{t3}(z_{b3} - z_3) + c_3(\dot{z}_{b3} - \dot{z}_3) \quad (3.28)$$

$$F_{t4} = k_{t4}(z_{b4} - z_4) + c_4(\dot{z}_{b4} - \dot{z}_4) \quad (3.29)$$

Uma vez conhecidas as forças, é possível escrever as equações de movimento, descritas a seguir.

$$M\ddot{z} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (3.30)$$

$$I_y\ddot{\phi} = a_1(F_1 + F_2) - a_2(F_3 + F_4) \quad (3.31)$$

$$I_x\ddot{\theta} = b_1(F_1 + F_3) - b_2(F_2 + F_4) \quad (3.32)$$

$$m_1\ddot{z}_1 = F_{t1} - F_1 \quad (3.33)$$

$$m_2\ddot{z}_2 = F_{t2} - F_2 \quad (3.34)$$

$$m_3\ddot{z}_3 = F_{t3} - F_3 \quad (3.35)$$

$$m_4\ddot{z}_4 = F_{t4} - F_4 \quad (3.36)$$

A partir das equações de movimento é possível escrever o sistema na forma de espaço de estados. Essa forma possibilita a simulação em software computacionais. Para esse caso, o vetor de estados x , o vetor de entradas u e as matrizes B , C e D estão descritas a seguir. A matriz A foi acrescentada no Anexo A para poder ser visualizada devido ao seu tamanho.

$$x = \begin{Bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \\ z_1 \\ \dot{z}_1 \\ z_2 \\ \dot{z}_2 \\ z_3 \\ \dot{z}_3 \\ z_4 \\ \dot{z}_4 \end{Bmatrix} \quad (3.37)$$

$$u = \begin{Bmatrix} z_{t1} \\ \dot{z}_{t1} \\ z_{t2} \\ \dot{z}_{t2} \\ z_{t3} \\ \dot{z}_{t3} \\ z_{t4} \\ \dot{z}_{t4} \end{Bmatrix} \quad (3.38)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{t1}}{m_1} & \frac{c_{t1}}{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_{t2}}{m_2} & \frac{c_{t2}}{m_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{t3}}{m_3} & \frac{c_{t3}}{m_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{t4}}{m_4} & \frac{c_{t4}}{m_4} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Dado que o objetivo do trabalho é melhorar o conforto dos ocupantes, foram desenvolvidas expressões para analisar também o deslocamento, a velocidade e a aceleração a que o motorista estava submetido. Para tanto foram utilizadas as equações fundamentais da cinemática do sólido (França & Matsumura, 2001), adotando uma distância de 0,5 metros a esquerda do centro de gravidade, 0,5 metros a frente do centro de gravidade e 0,3 metros acima do centro de gravidade, assim pode-se chegar nas seguintes expressões (3.40), (3.41) e (3.42).

$$z_M = 0,5. \theta - 0,5. \varphi + 0,3. z \quad (3.40)$$

$$\dot{z}_M = \dot{z} + \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \times (z_M - z) \quad (3.41)$$

$$\ddot{z}_M = \ddot{z} + \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \\ 0 \end{bmatrix} \times (z_M - z) \quad (3.42)$$

Foram desenvolvidas simulações para avaliar o modelo desenvolvido. Essas simulações estão presentes no item 3.2.3.

3.2 Simulações dos modelos

A partir das equações de movimento escritas no formato de espaço de estados foi possível simular os modelos elaborados utilizando software computacional. As simulações visaram verificar a adequação dos modelos. O modelo foi simulado para condição inicial nula e entrada nula para verificar se ele se mantém em sua posição de equilíbrio. O modelo também teve sua estabilidade verificada, ou seja, avaliou-se a resposta do sistema para um condição inicial não nula.

Além dessas verificações foram feitas algumas simulações para entradas características, a fim de avaliar a resposta do modelo. As entradas utilizadas foram:

- Entrada degrau para condições iniciais nulas;
- Entrada senoidal (modelo de ¼ de carro e ½ carro);

- Entradas senoidais defasadas para as rodas da direita e da esquerda (apenas para o modelo de carro completo).

Além dessas simulações foram obtidos os polos, o amortecimento, a frequência natural dos modos de vibrar e as constantes de tempo.

3.2.1 Simulação do modelo de ¼ de carro

O modelo de ¼ de carro foi simulado para as condições descritas anteriormente. Os parâmetros adotados para desenvolver as simulações estão descritos na Tabela 3. O amortecimento do pneu foi desprezado por ser muito pequeno.

Tabela 3 - Parâmetros da simulação do modelo de ¼ de carro (Türkay & Akçay, 2008)

M	240 kg
m	36 kg
k_1	16000 N/m
k_2	160000 N/m
c_1	960 N.s/m
v	10 m/s

Para avaliar a estabilidade do sistema, ele foi simulado considerando uma condição inicial deslocada de 0,1 m da posição de equilíbrio da massa suspensa. A Figura 18 mostra que conforme esperado, a massa suspensa oscila até retornar ao equilíbrio. A Figura 19 mostra o comportamento da massa não suspensa que oscila devido à massa suspensa, mas também retorna à condição de equilíbrio. A Figura 20 mostra a deformação da mola e a velocidade relativa entre o chassi e a roda, que também estão de acordo com o esperado.

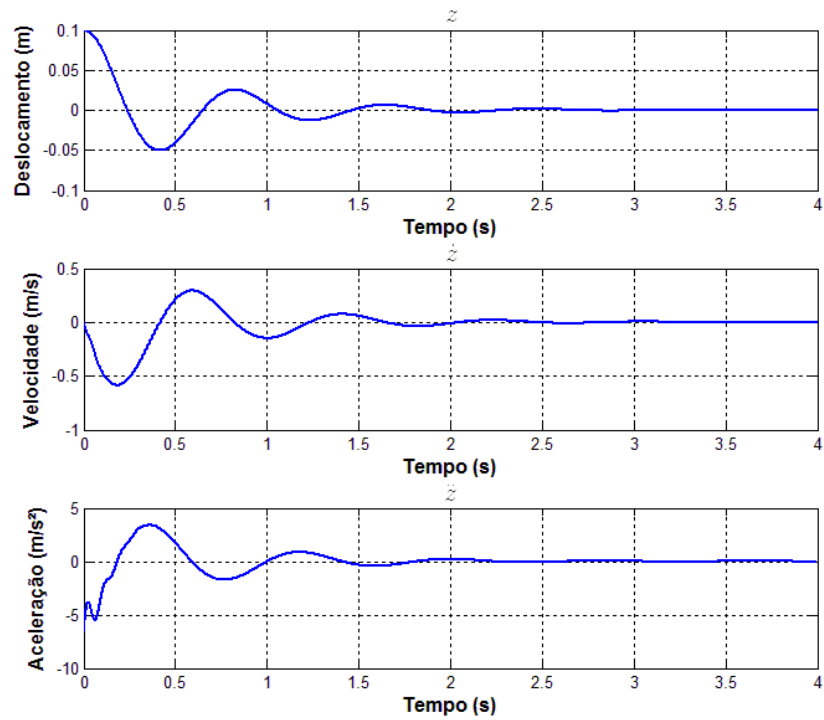


Figura 18 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

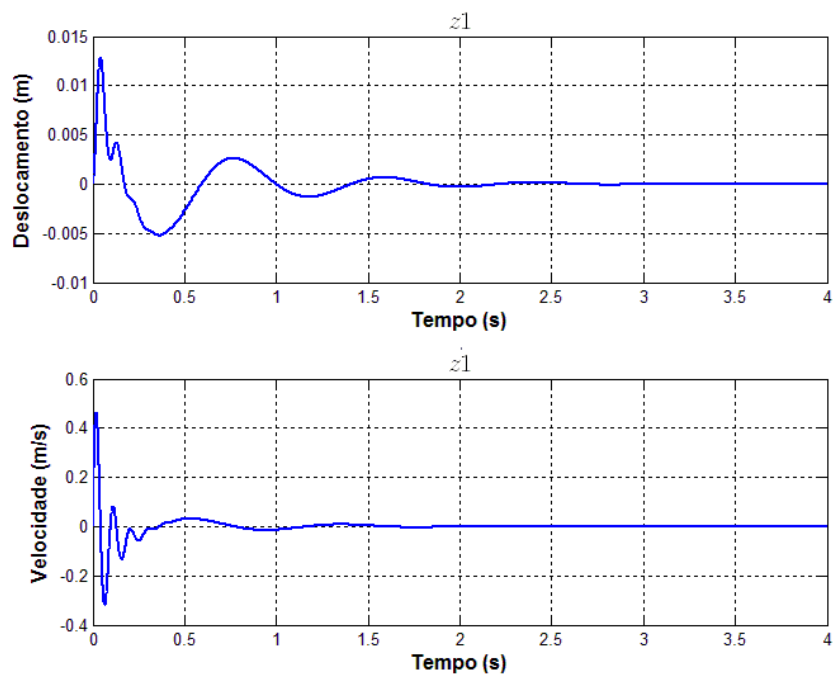


Figura 19 - Deslocamento e velocidade da massa não suspensa para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

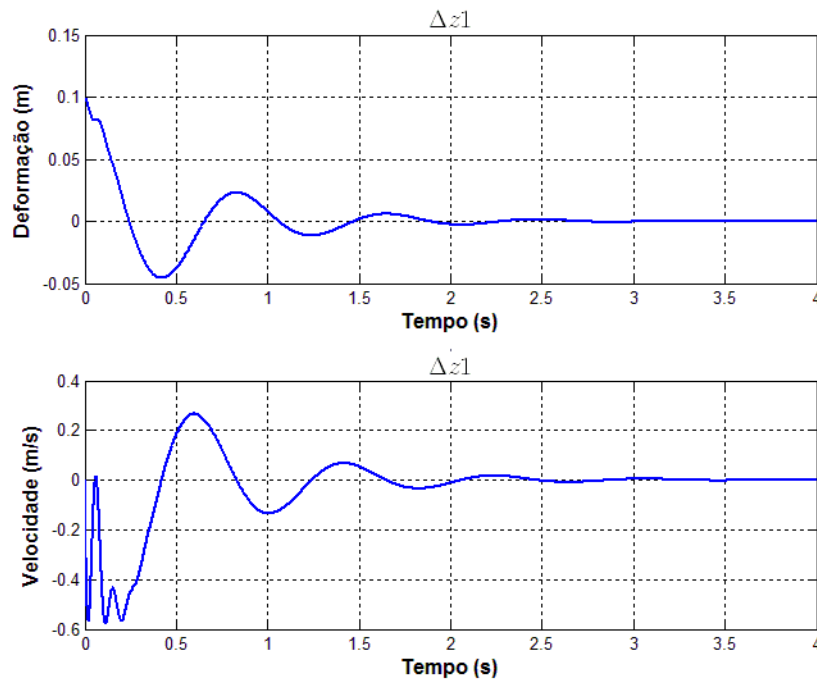


Figura 20 - Deformação e velocidade de deformação da mola para condição inicial não nula para o modelo de ¼ de carro

O sistema também foi simulado para condições iniciais nulas e considerando uma entrada degrau de 0,1 m na posição da massa m_2 . A Figura 21 e a Figura 22 mostram a resposta de cada uma das variáveis do sistema para essa simulação. Percebe-se que conforme era esperado o sistema oscilou até atingir o equilíbrio em 0,1 m. Além dos valores das variáveis de estado, foram plotados o deslocamento entre o chassi e a roda e a velocidade desse deslocamento, que podem ser vistos na Figura 23. É possível notar que a variação brusca da posição da massa não suspensa provoca grandes variações de aceleração e velocidade, no entanto, o deslocamento é suavizado para a massa suspensa, mostrando o funcionamento da suspensão que tenta isolar a os passageiros das vibrações.

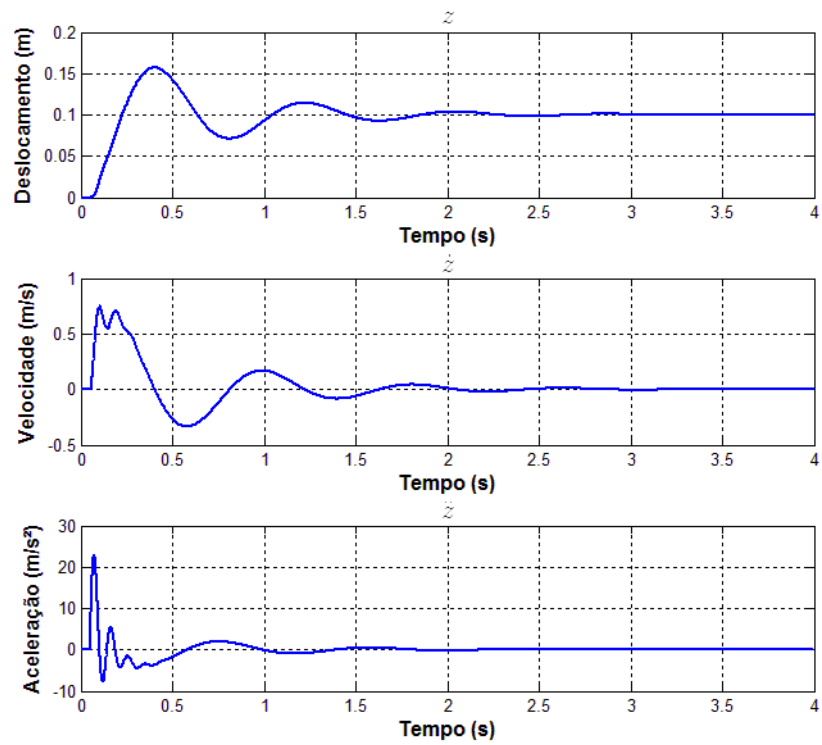


Figura 21 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

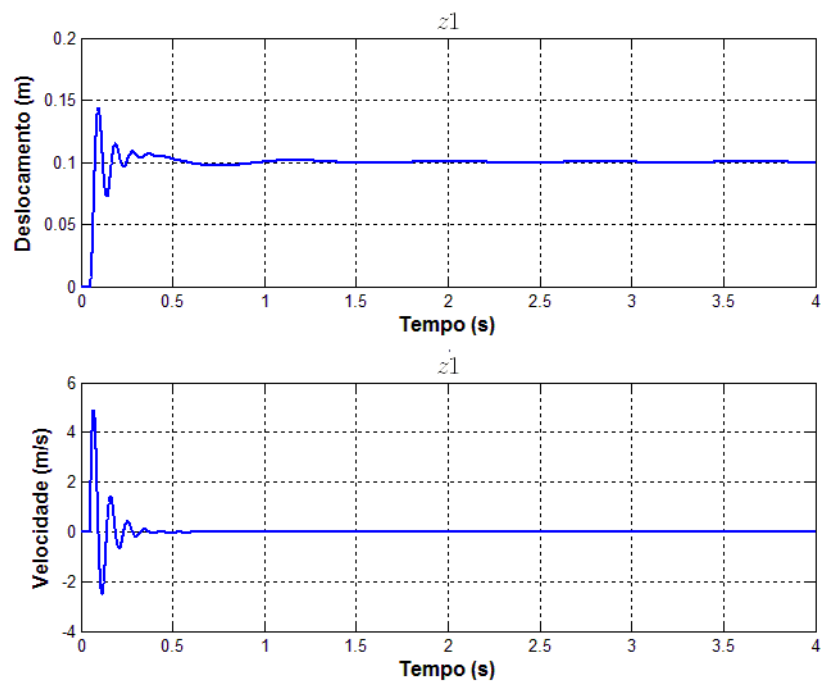


Figura 22 - Deslocamento e velocidade da massa não suspensa para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

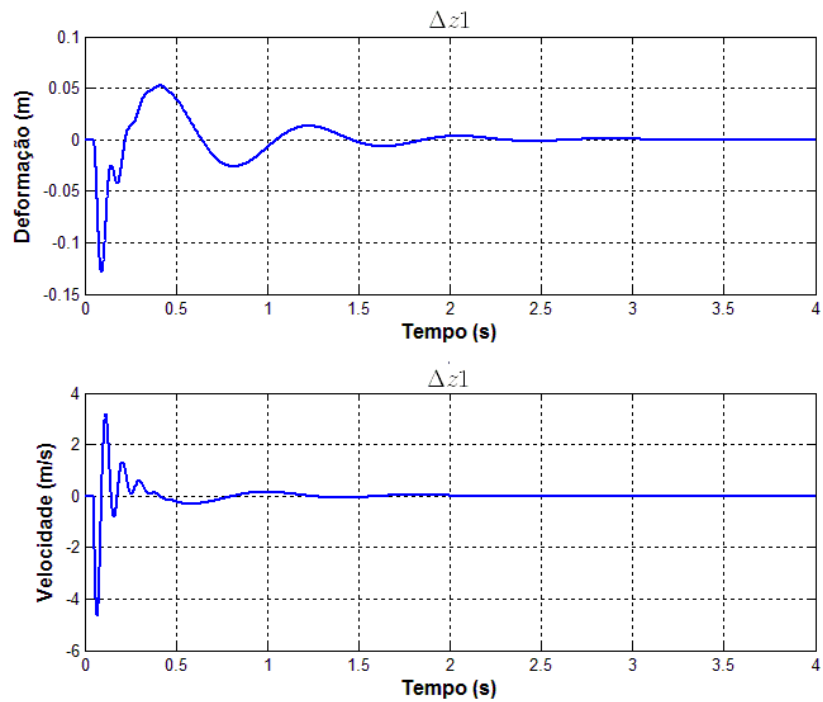


Figura 23 - Deformação e velocidade de deformação da mola para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

Outra avaliação do modelo foi simulá-lo para uma entrada senoidal. A senóide foi criada, visando representar irregularidades na pista, com comprimento de onda de 15 m e amplitude de 0,1 m. Os resultados dessa simulação podem ser vistos na Figura 24, Figura 25 e Figura 26.

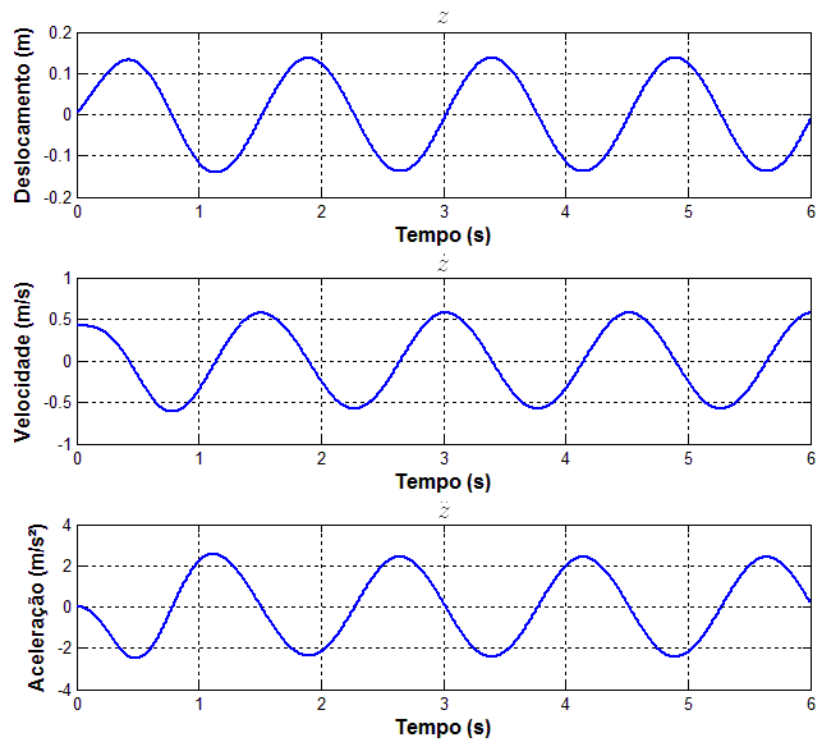


Figura 24 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para entrada senoidal para o modelo de ¼ de carro

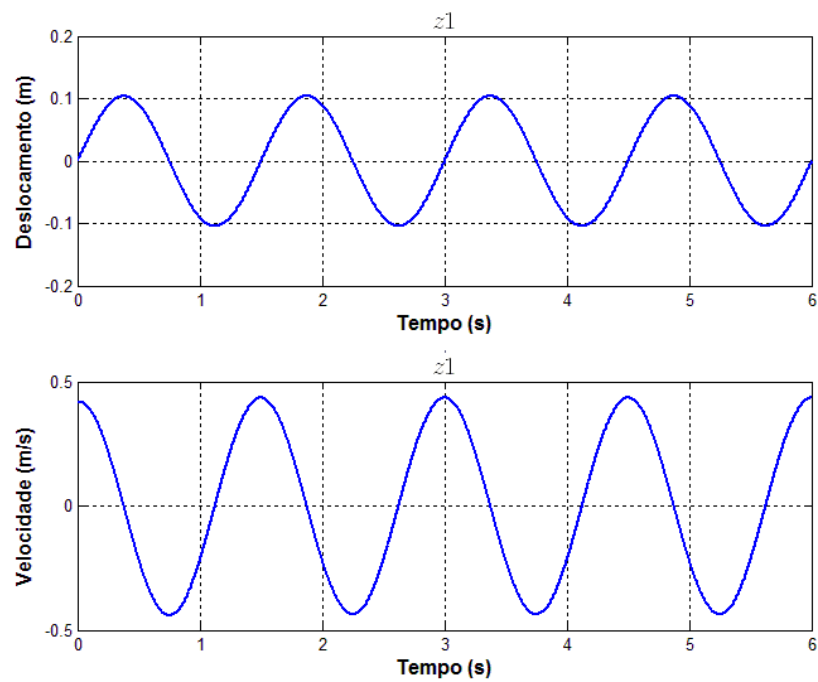


Figura 25 - Deslocamento e velocidade da massa não suspensa para entrada senoidal para o modelo de ¼ de carro

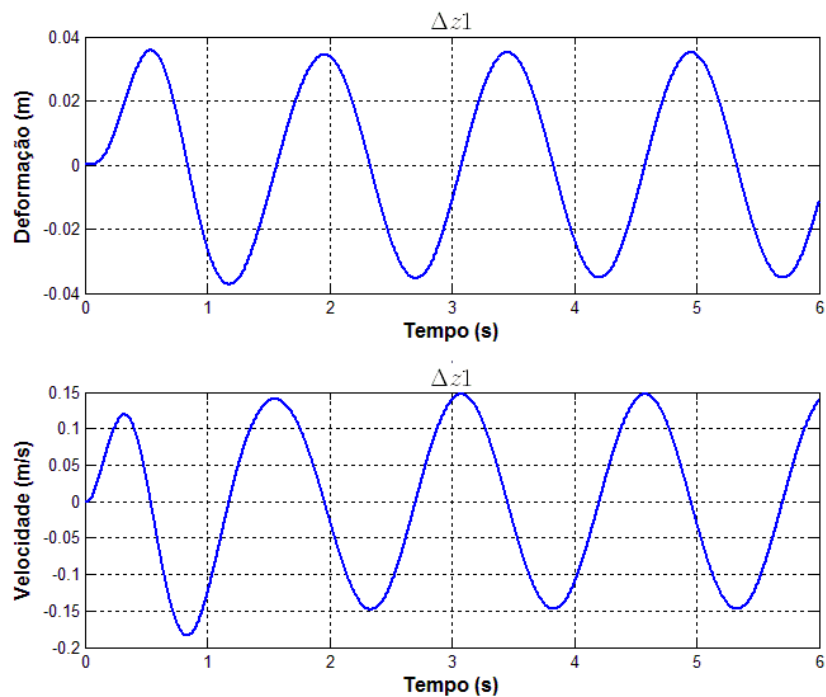


Figura 26 - Deformação e velocidade de deformação da mola para entrada senoidal para o modelo de ¼ de carro

Também foi possível analisar os autovalores (polos do sistema), a frequência de cada um desses polos e o amortecimento. Esses valores estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise modal do sistema de ¼ de carro

Autovalor	Amortecimento	Frequência	
		rad/s	Hz
$-13,6578 + 67,9396i$	$1,97 \cdot 10^{-1}$	69,3	11,03
$-13,6578 - 67,9396i$	$1,97 \cdot 10^{-1}$	69,3	11,03
$-1,6755 + 7,6741i$	$2,13 \cdot 10^{-1}$	7,85	1,25
$-1,6755 - 7,6741i$	$2,13 \cdot 10^{-1}$	7,85	1,25

Os valores obtidos apresentam coerência com a realidade, visto que a frequência de afundamento (heave), normalmente é da ordem de 10 Hz e a frequência da oscilação das rodas, aproximadamente, 10 vezes menor.

Também foram determinados os autovetores do sistema (colunas da matriz V), que indicam os modos de vibrar do modelo.

$$V = \begin{bmatrix} 0,0007 - 0,0005i & 0,0007 + 0,0005i & 0,0268 + 0,1228i & 0,0268 - 0,1228i \\ 0,0219 + 0,0536i & 0,0219 - 0,0536i & -0,9877 & -0,9877 \\ 0,0028 + 0,0141i & 0,0028 - 0,0141i & -0,0026 + 0,0115i & -0,0026 - 0,0115i \\ -0,9982 & -0,9982 & -0,0839 - 0,0391i & -0,0839 + 0,0391i \end{bmatrix}$$

3.2.2 Simulação do modelo de ½ carro

O modelo de ½ de carro foi simulado para as condições descritas anteriormente. Os parâmetros adotados para desenvolver as simulações estão descritos na Tabela 5. Esses valores foram obtidos por meio de uma extrapolação dos valores usados para ¼ de carro. O amortecimento do pneu foi desprezado por ser muito pequeno.

Tabela 5 - Parâmetros da simulação do modelo de ½ carro

M	480
m ₁ e m ₂	36 kg
a ₁	1,15 m
a ₂	1,35 m
k ₁ e k ₂	16000 N/m
k _{t1} e k _{t2}	160000 N/m
c ₁ e c ₂	960 N.s/m
v	10 m/s

Inicialmente, avaliou-se a estabilidade do sistema. Foi feita uma simulação para um caso em que a massa suspensa apresentava uma condição inicial deslocada de 0,1 m da posição de equilíbrio. A Figura 27 mostra que o sistema oscila até atingir o equilíbrio. A Figura 28 mostra que as variações angulares são muito pequenas, uma vez que o deslocamento foi vertical no CG. As pequenas oscilações são fruto da diferença entre as cotas a₁ e a₂. A Figura 29 e a Figura 30 mostram o comportamento

das massas não suspensas e das molas, que estão de acordo com o esperado, ou seja, oscilam até atingir o equilíbrio.

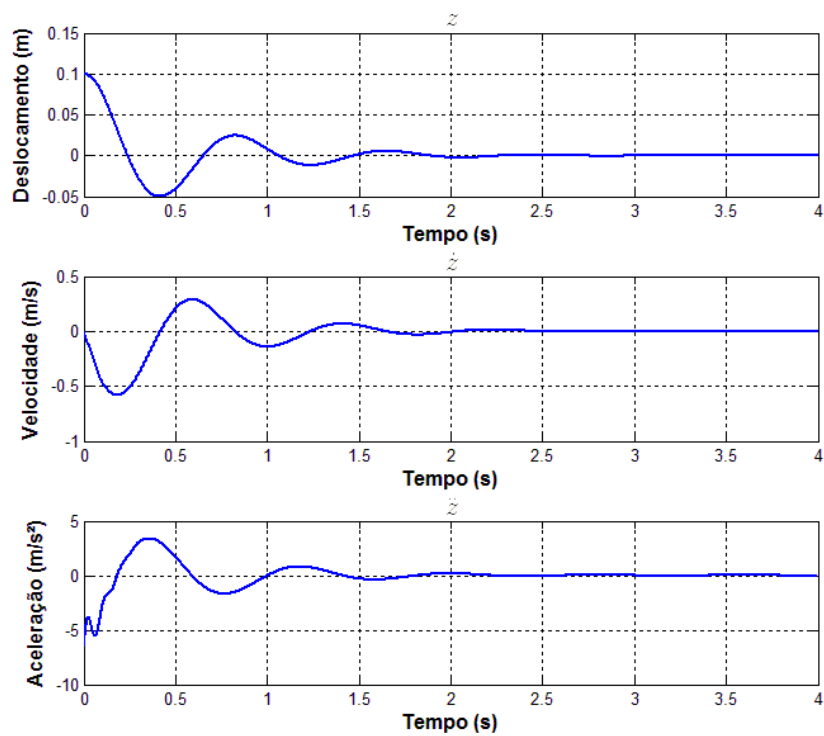


Figura 27 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

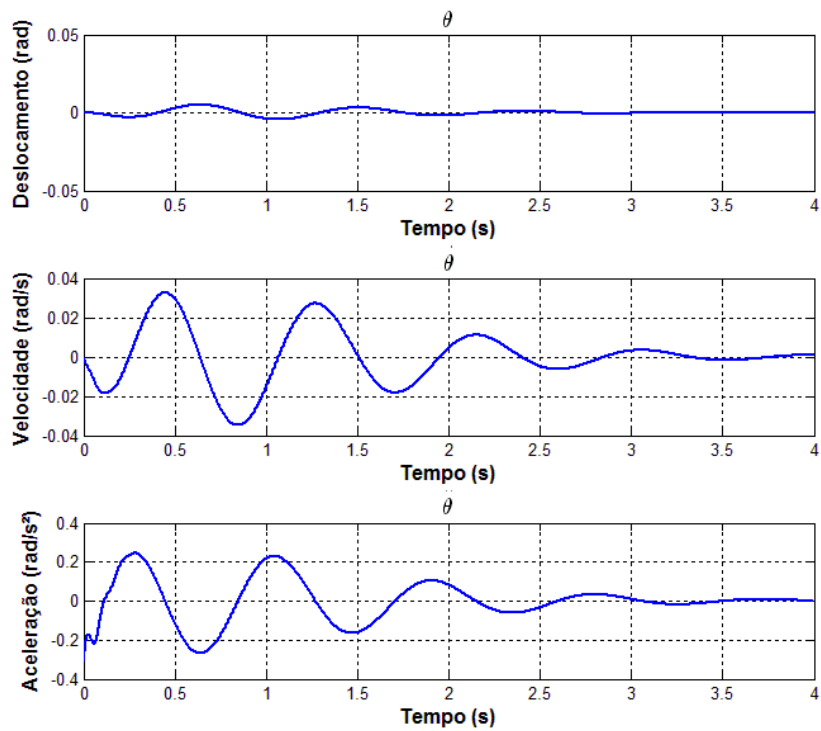


Figura 28 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

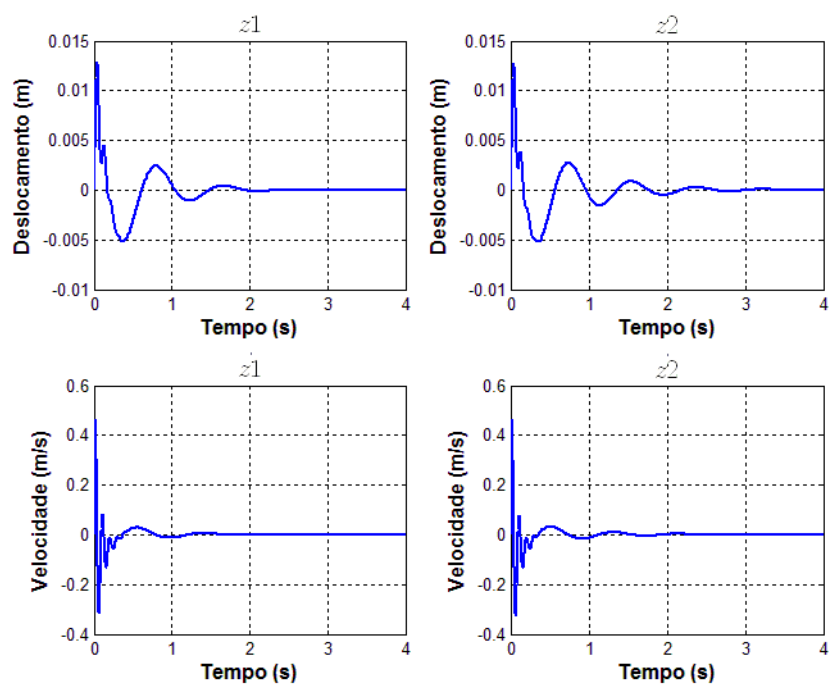


Figura 29 - Deslocamento e velocidade das massas não suspensas para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

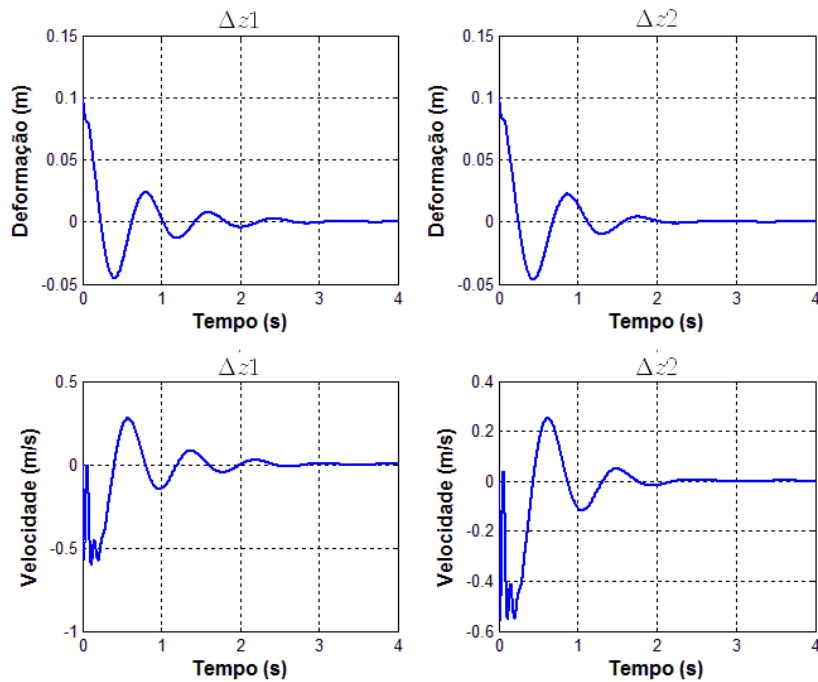


Figura 30 - Deformação e velocidade de deformação das molas para condição inicial não nula para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

O sistema foi simulado para condições iniciais nulas e considerando uma entrada de 0,1 m na posição da roda 1. Baseado na velocidade adotada para o veículo a mesma entrada degrau foi aplicada à roda 2 com um atraso de 0,25 segundos. A Figura 31 e a Figura 32 mostram o comportamento da carroceria para entrada degrau. É possível notar a influência da entrada degrau nas rodas traseiras pelas variações no comportamento da massa suspensa logo após 0,25 segundos. A Figura 33 e a Figura 34 mostram o comportamento das rodas e das molas. É possível notar claramente o momento em que a roda traseira sofre a entrada degrau. Também nota-se um comportamento diferente da mola traseira que amortecia a entrada nas rodas dianteiras, quando sofre a entrada nas rodas traseiras. Em todos os casos é possível observar um comportamento adequado, visto que o sistema atinge o equilíbrio na posição 0,1 e com velocidade e aceleração nulas.

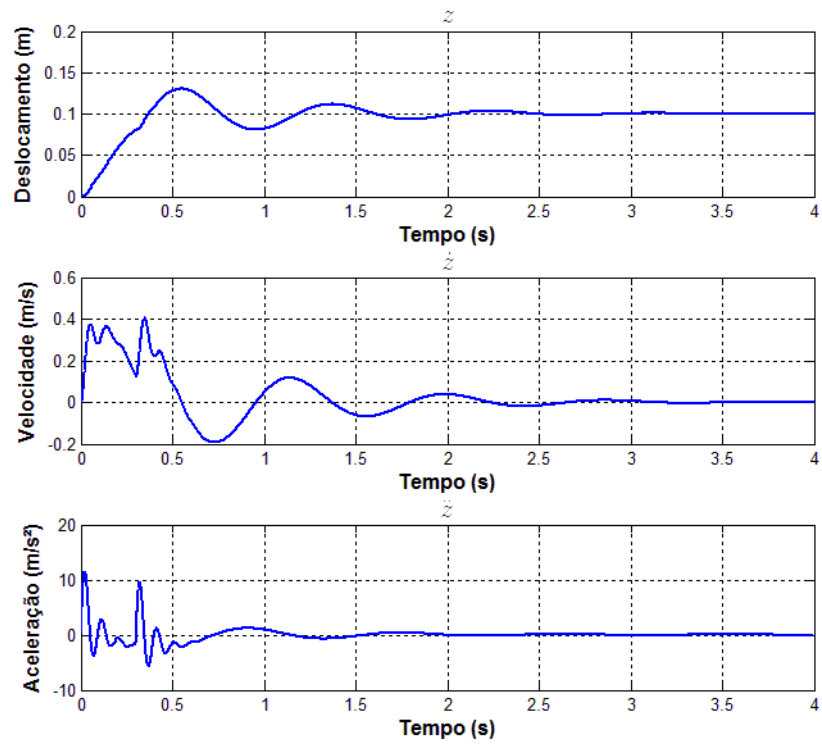


Figura 31 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

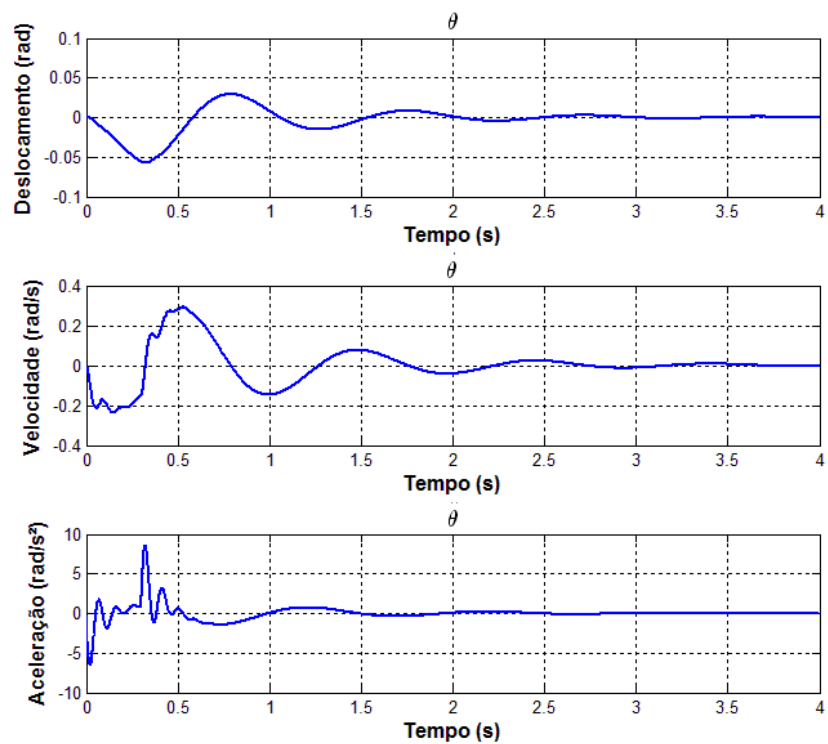


Figura 32 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

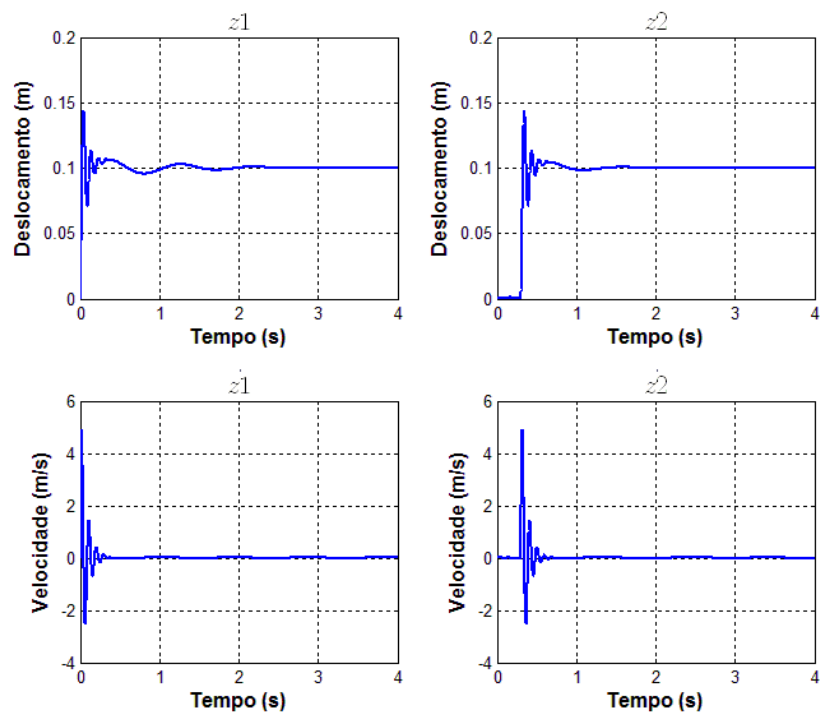


Figura 33 - Deslocamento e velocidade das massas não suspensas para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

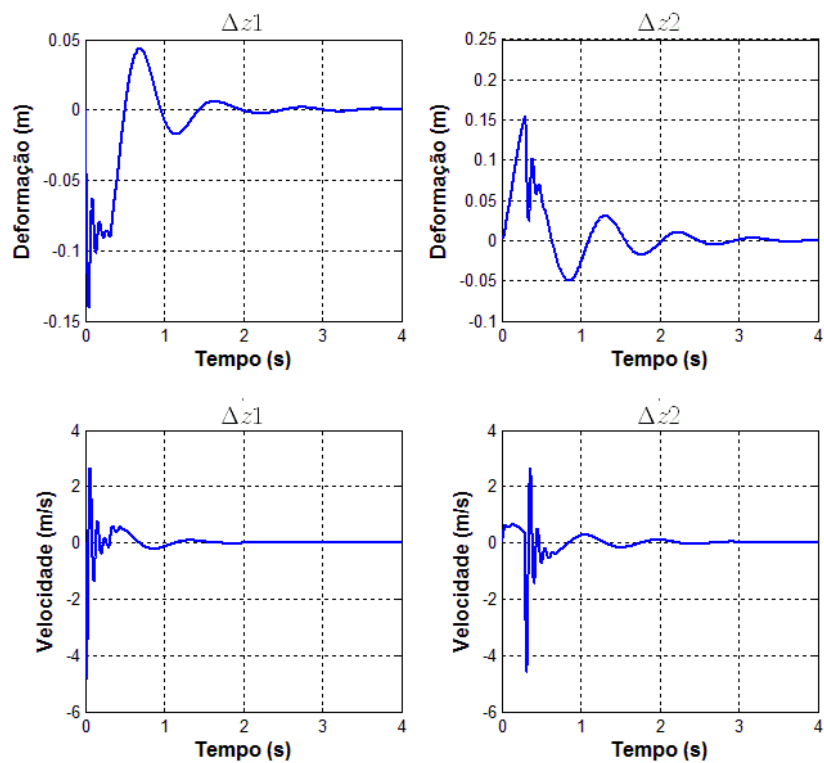


Figura 34 - Deformação e velocidade de deformação das molas para entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

Outra avaliação do modelo foi simulá-lo para uma entrada senoidal. A senóide foi criada, visando representar irregularidades na pista, com comprimento de onda de 15 m e amplitude de 0,1 m. A Figura 35 e a Figura 36 mostram o comportamento da carroceria. A figura Figura 37 e a Figura 38 mostram o comportamento das rodas e das molas, respectivamente. Notam-se algumas variações bruscas de velocidade e aceleração, principalmente nas rodas traseiras. Isso ocorre pois a posição inicial das rodas é nula, mas a entrada senoidal não é nula inicialmente nas rodas traseiras, gerando uma condição transiente brusca.

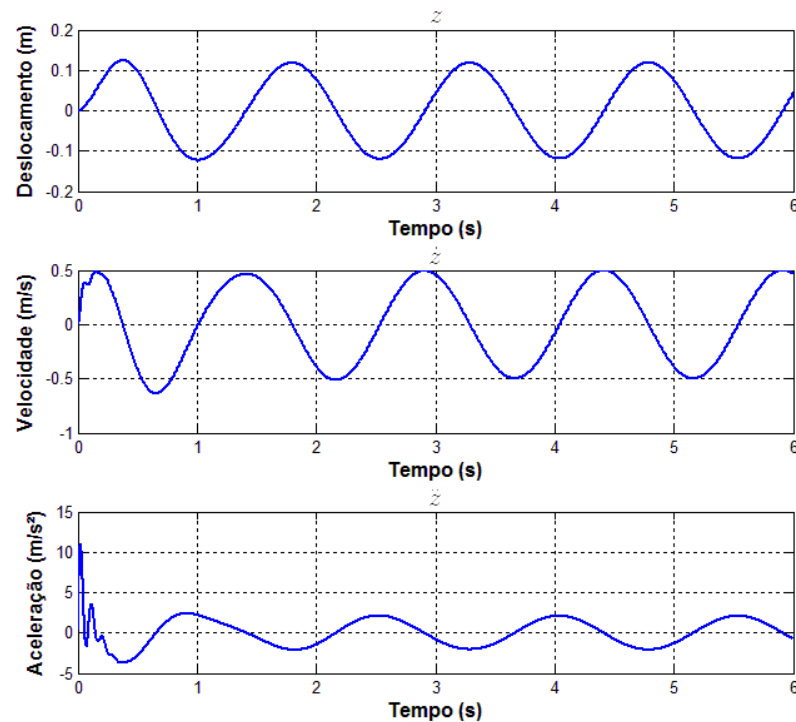


Figura 35 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

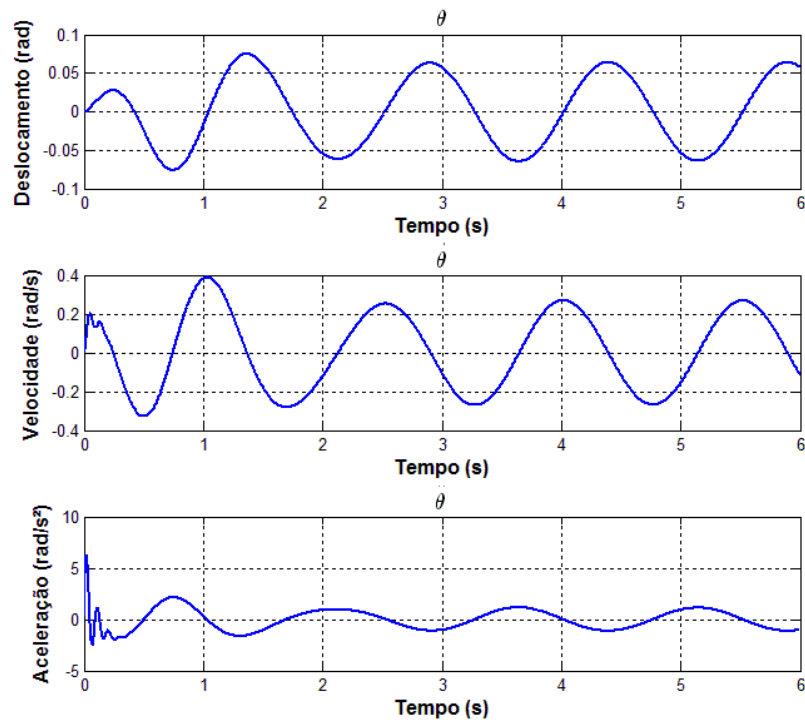


Figura 36 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

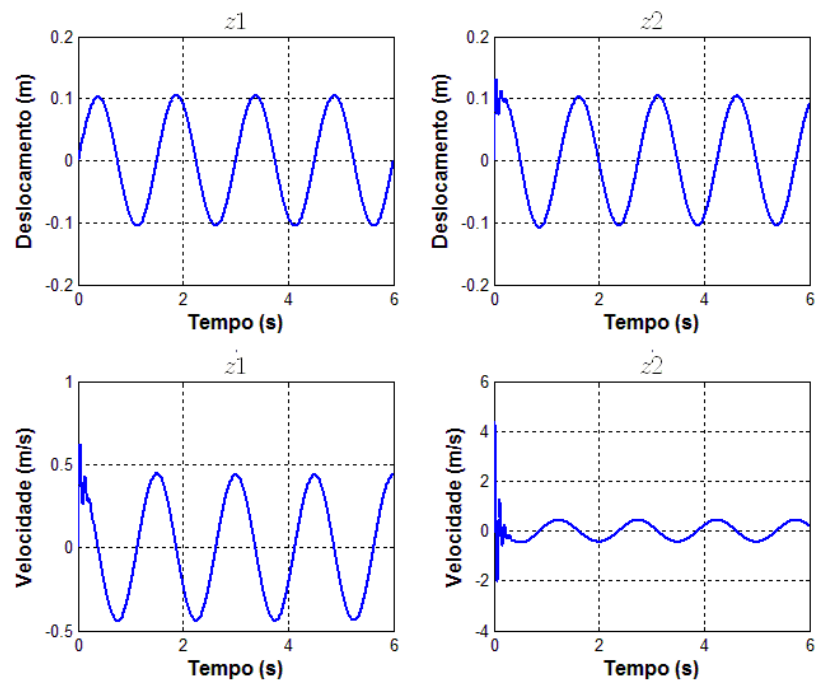


Figura 37 - Deslocamento e velocidade das massas não suspensas para entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

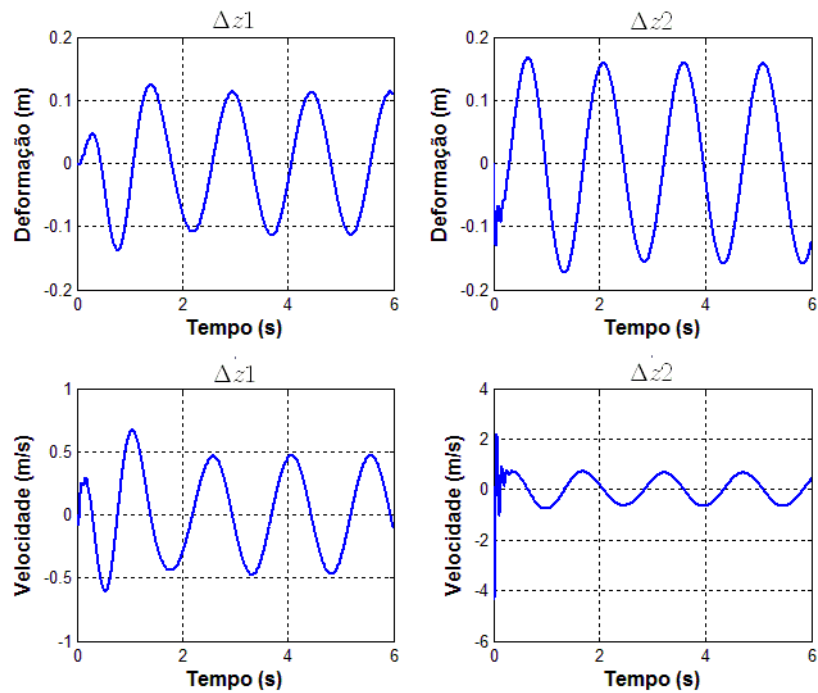


Figura 38 - Deformação e velocidade de deformação das molas para entrada senoidal para o modelo de ½ carro

Também foi possível analisar os autovalores (polos do sistema), a frequência de cada um desses polos e o amortecimento. Esses valores estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Análise modal do sistema de ½ carro

Autovalor	Amortecimento	Frequência	
		rad/s	Hz
- 13,6633 + 67,9263i	$1,97 \cdot 10^{-1}$	69,3	11,03
- 13,6633 - 67,9263i	$1,97 \cdot 10^{-1}$	69,3	11,03
- 13,5770 + 68,1298i	$1,95 \cdot 10^{-1}$	69,5	11,06
- 13,5770 - 68,1298i	$1,95 \cdot 10^{-1}$	69,5	11,06
- 1,2295 + 6,6114i	$1,83 \cdot 10^{-1}$	6,72	1,07
- 1,2295 - 6,6114i	$1,83 \cdot 10^{-1}$	6,72	1,07
- 1,7065 + 7,7416i	$2,15 \cdot 10^{-1}$	7,93	1,26
- 1,7065 - 7,7416i	$2,15 \cdot 10^{-1}$	7,93	1,26

Analisando os valores obtidos, percebe-se que eles estão em conformidade com a realidade. A frequência de afundamento e a das rodas se mantiveram da ordem de 10 e 1 Hz, respectivamente. Além disso, foi obtida uma frequência de pitch próxima da de heave, o que também é adequado.

Também foram determinados os autovetores do sistema (colunas da matriz V, apresentada no Anexo A devido às suas dimensões), que indicam os modos de vibrar do sistema.

3.2.3 Simulação do modelo de carro completo

O modelo de carro completo foi simulado para as condições descritas anteriormente. Os parâmetros adotados para desenvolver as simulações estão descritos na Tabela 7. O amortecimento do pneu foi desprezado por ser muito pequeno.

Tabela 7 - Parâmetros da simulação do modelo de carro completo

M	960 kg
I_{xx}	450 kg.m ²
I_{yy}	1000 kg.m ²
m_1, m_2, m_3 e m_4	36 kg
a_1	1,15 m
a_2	1,35 m
b_1	0,70 m
b_2	0,70 m
k_1, k_2, k_3 e k_4	16000 N/m
k_{t1}, k_{t2}, k_{t3} e k_{t4}	160000 N/m
c_1, c_2, c_3 e c_4	960 N.s/m
v	10 m/s

Inicialmente, foi avaliada a estabilidade do sistema para uma condição inicial não nula. Adotou-se uma condição inicial deslocada de 0,1 m do equilíbrio e foi feita a simulação. Os resultados das simulações podem ser vistos nos gráfico da Figura 39

à Figura 45. Nota-se que o sistema retorna para o equilíbrio. É possível observar uma pequena diferença entre as respostas das rodas dianteiras e traseiras devido à diferença entre as cotas a_1 e a_2 , no entanto o formato da resposta é muito semelhante. É possível notar que as rodas dianteiras e traseiras tem respostas iguais entre si. Isso ocorre devido às cotas b_1 e b_2 serem iguais. O fato de não haver rolagem é confirmado pelo gráfico da Figura 41.

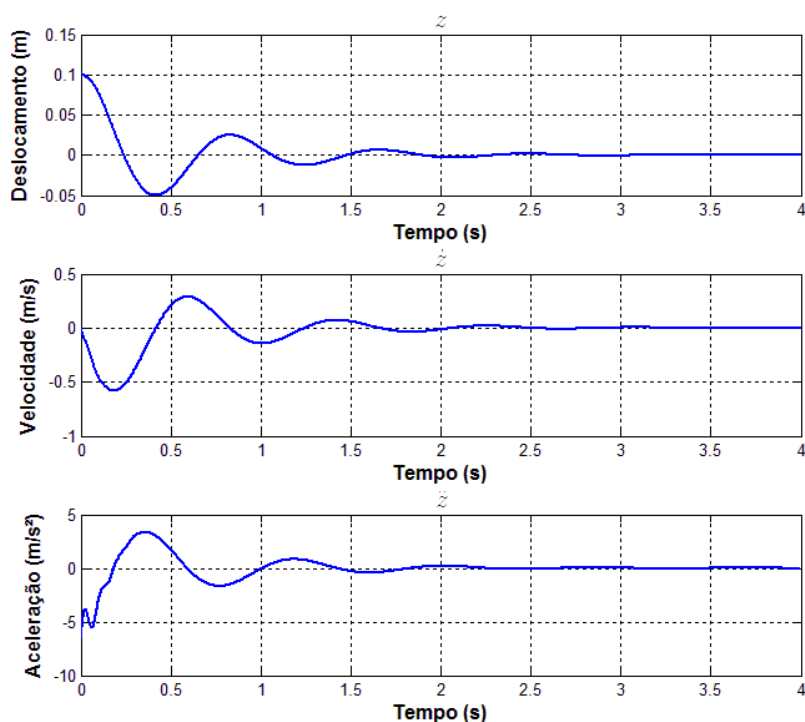


Figura 39 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de carro completo

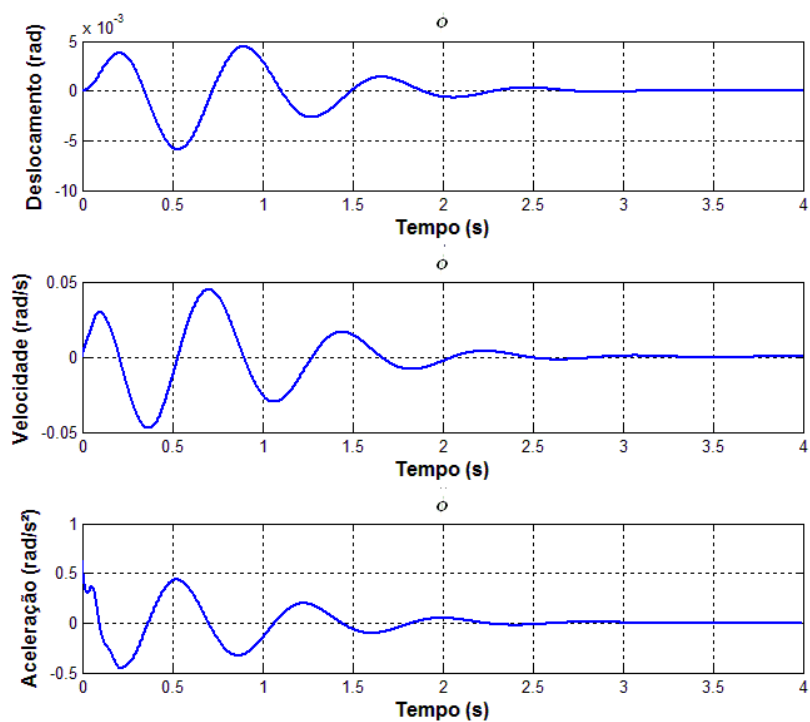


Figura 40 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de carro completo

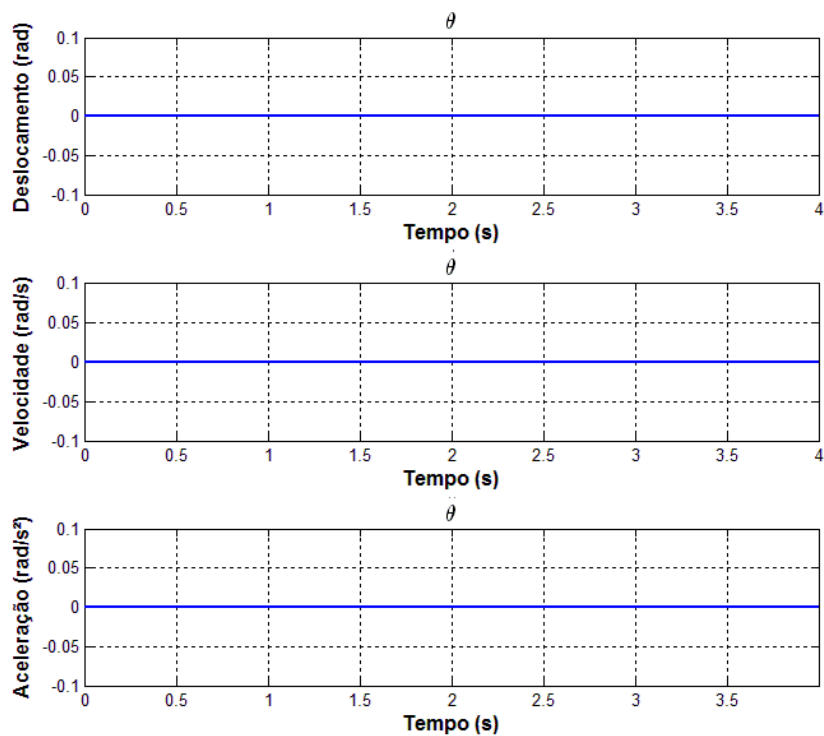


Figura 41 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa para condição inicial não nula para o modelo de carro completo

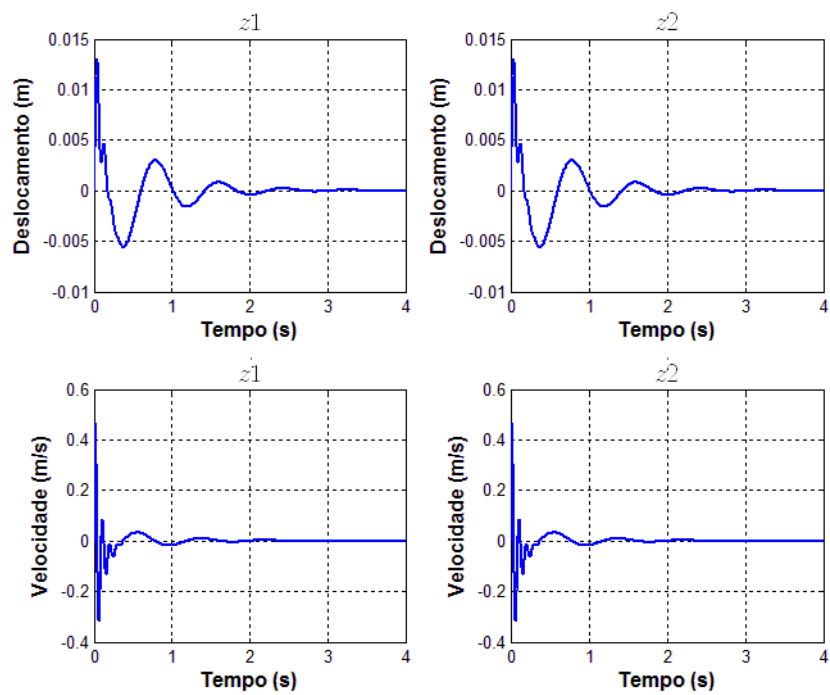


Figura 42 - Deslocamento e velocidade das rodas dianteiras para condição inicial não nula para o modelo de carro completo

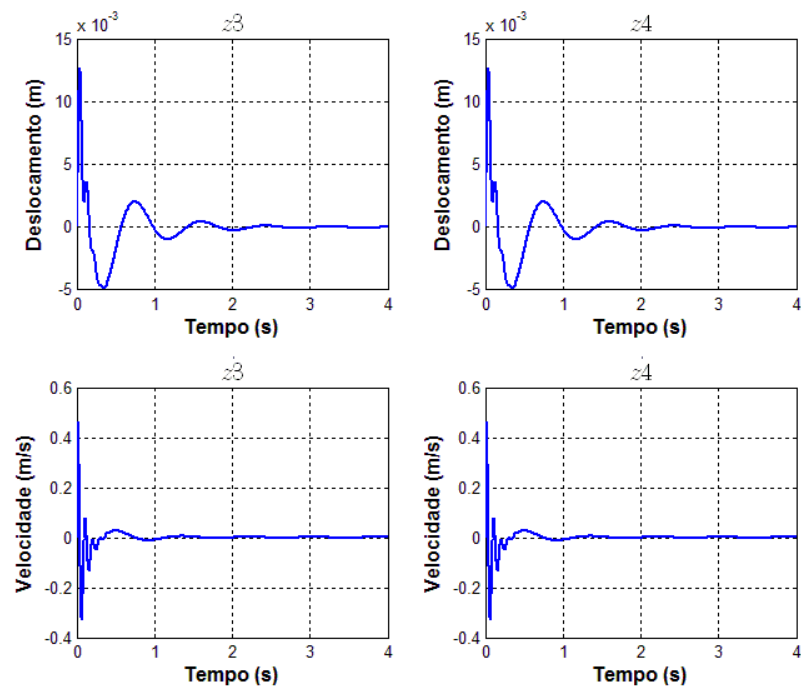


Figura 43 - Deslocamento e velocidade das rodas traseiras para condição inicial não nula para o modelo de carro completo

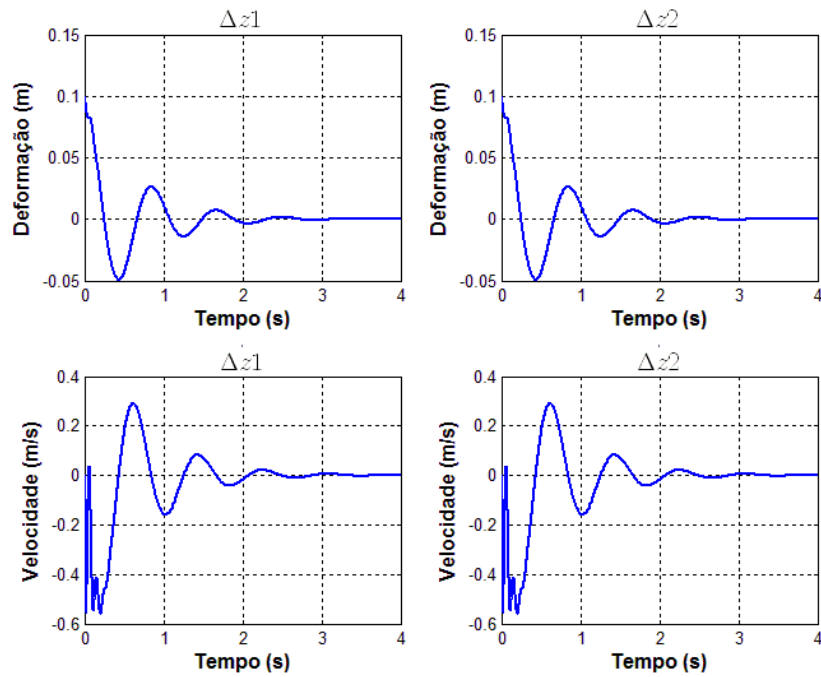


Figura 44 - Deformação e velocidade de deformação das molas dianteiras para condição inicial não nula para o modelo de carro completo

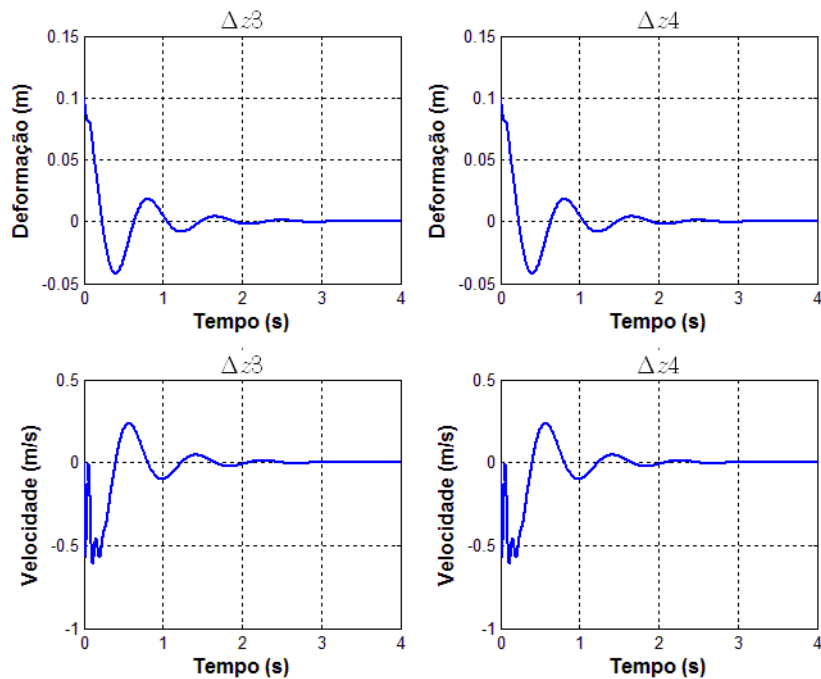


Figura 45 - Deformação e velocidade de deformação das molas traseiras para condição inicial não nula para o modelo de carro completo

O sistema foi simulado para condições iniciais nulas e considerando uma entrada degrau de 0,1 m na posição das rodas dianteiras. Baseado na velocidade adotada para o veículo a mesma entrada degrau foi aplicada à roda 2 com um atraso de 0,25 segundos. Os resultados da simulação podem ser vistos nos gráficos da Figura 46 à Figura 52. É possível notar que o sistema se comportou conforme esperado, estabilizando em 0,1 m e sem apresentar rolagem, uma vez que as duas rodas dianteiras e as duas rodas traseiras recebem a entrada ao mesmo tempo. É possível notar claramente o momento em que as rodas traseiras recebem o estímulo.

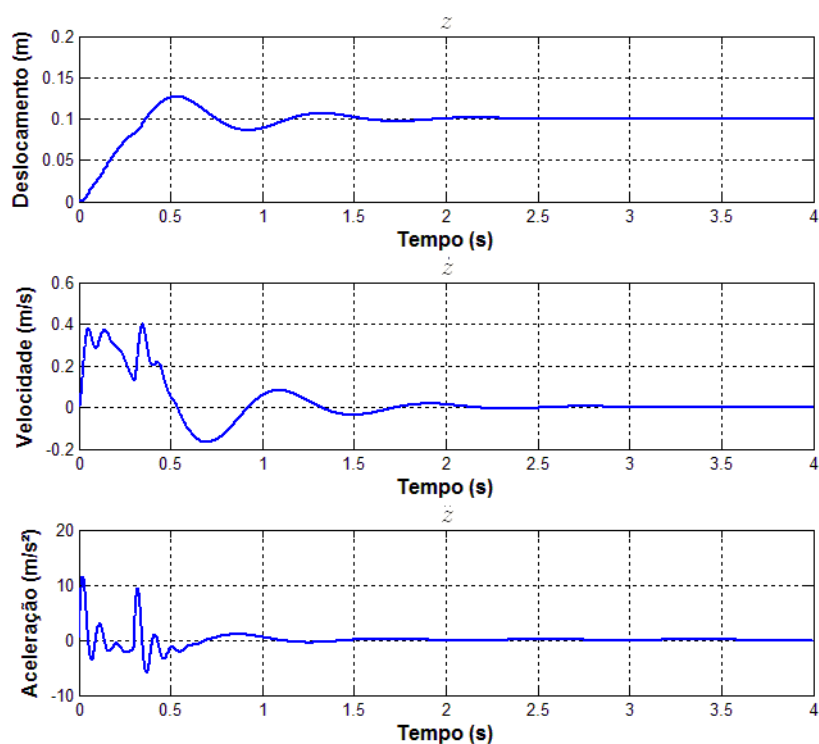


Figura 46 - Deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

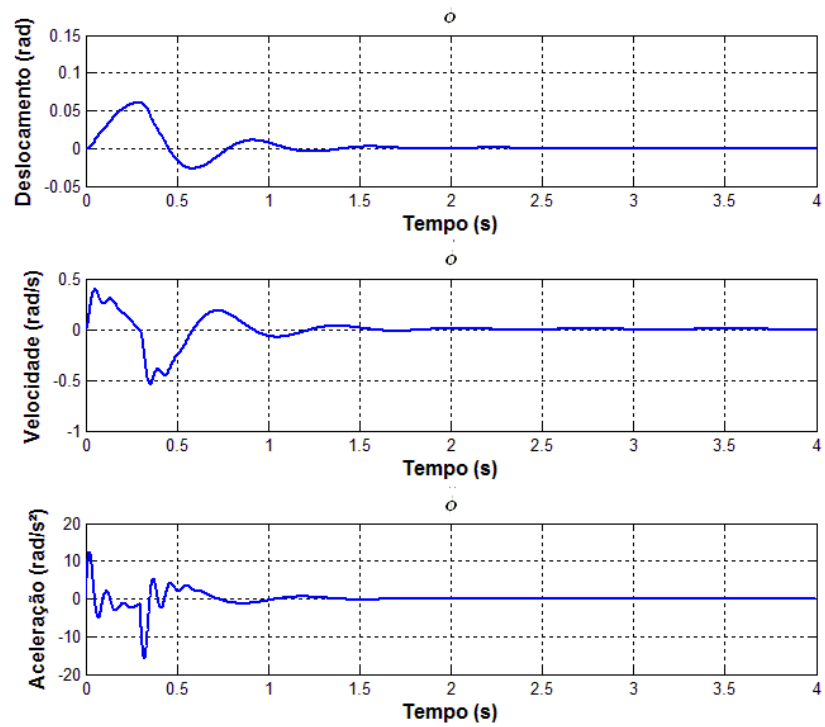


Figura 47 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

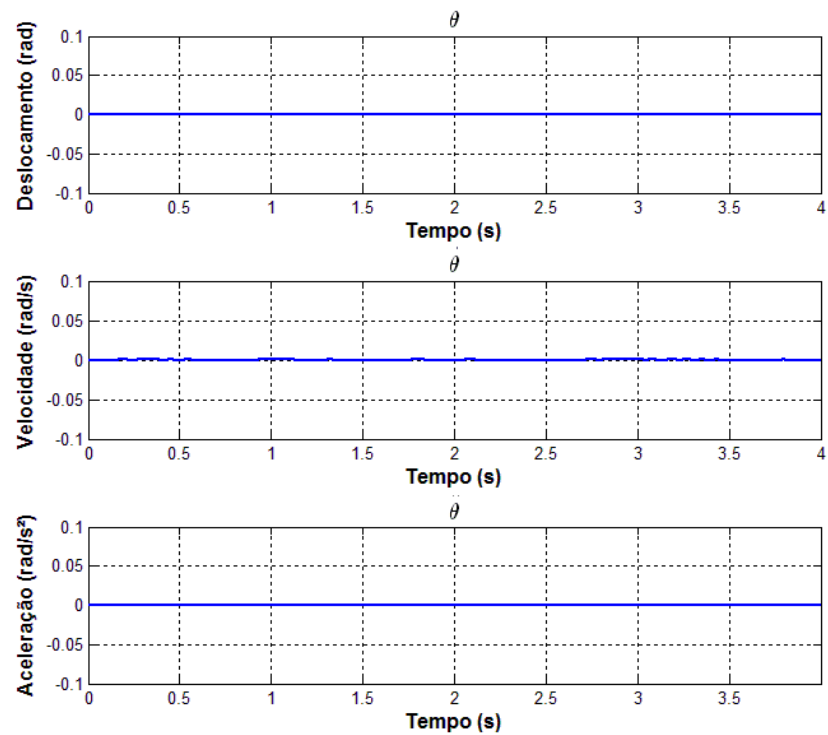


Figura 48 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

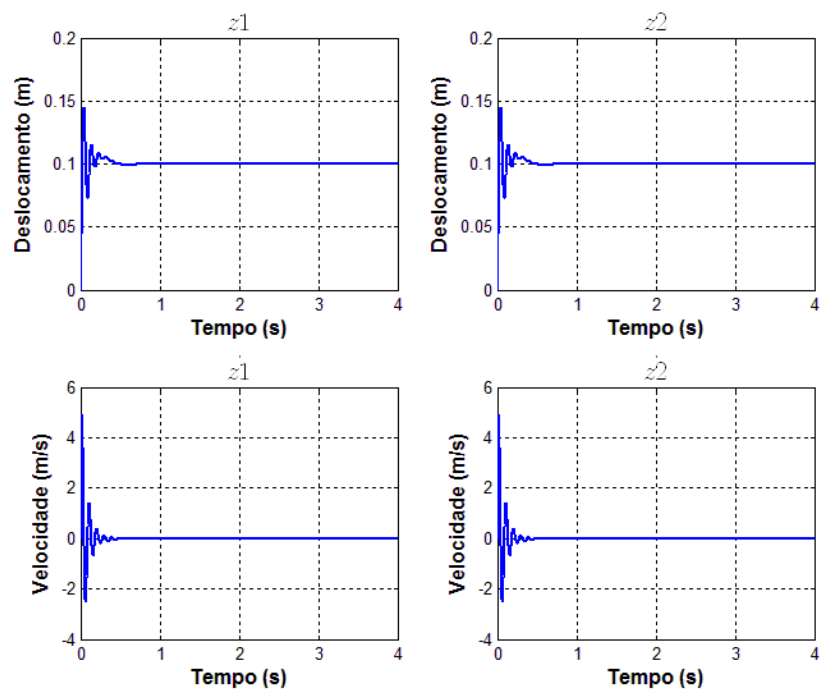


Figura 49 - Deslocamento e velocidade das rodas dianteiras para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

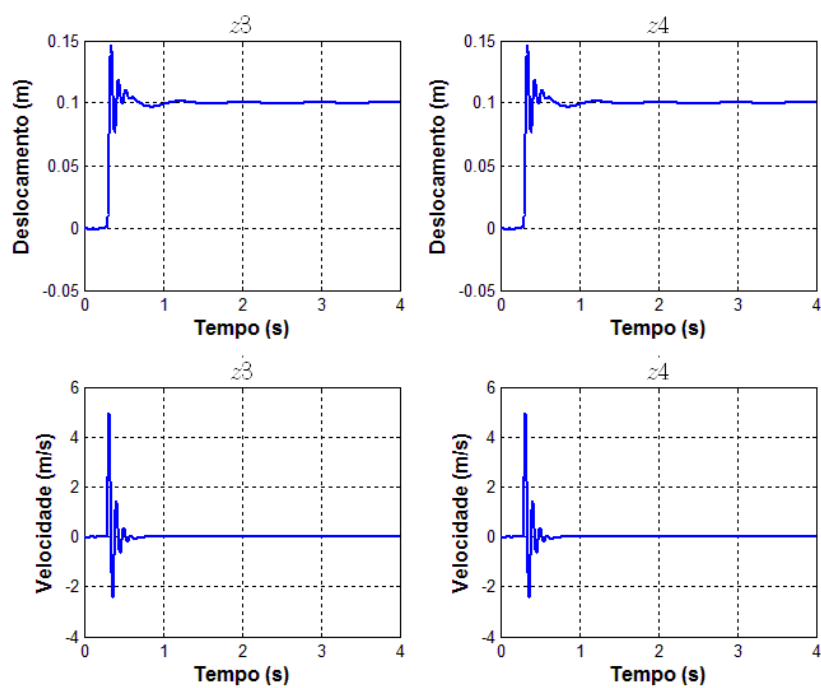


Figura 50 - Deslocamento e velocidade das rodas traseiras para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

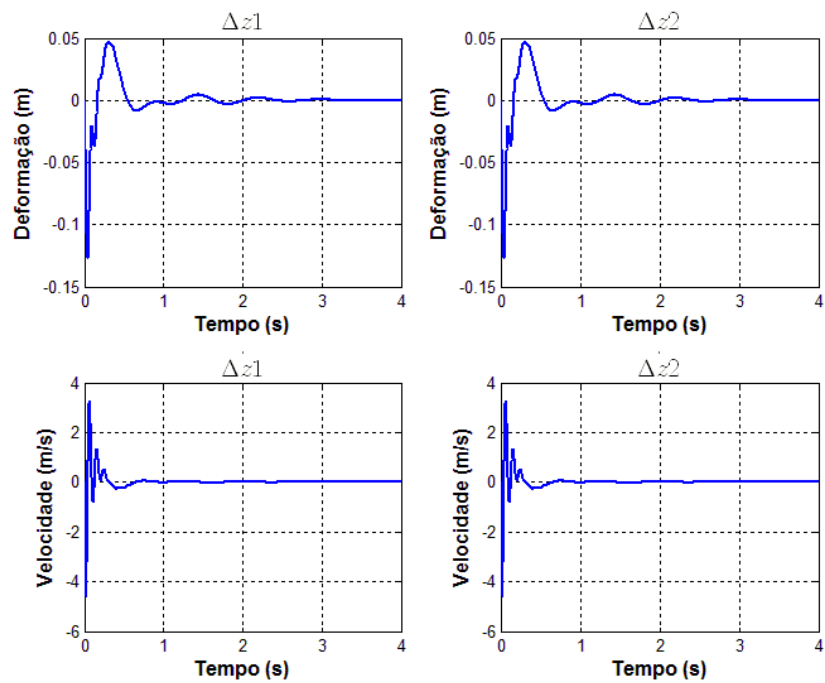


Figura 51 - Deformação e velocidade de deformação das molas dianteiras para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

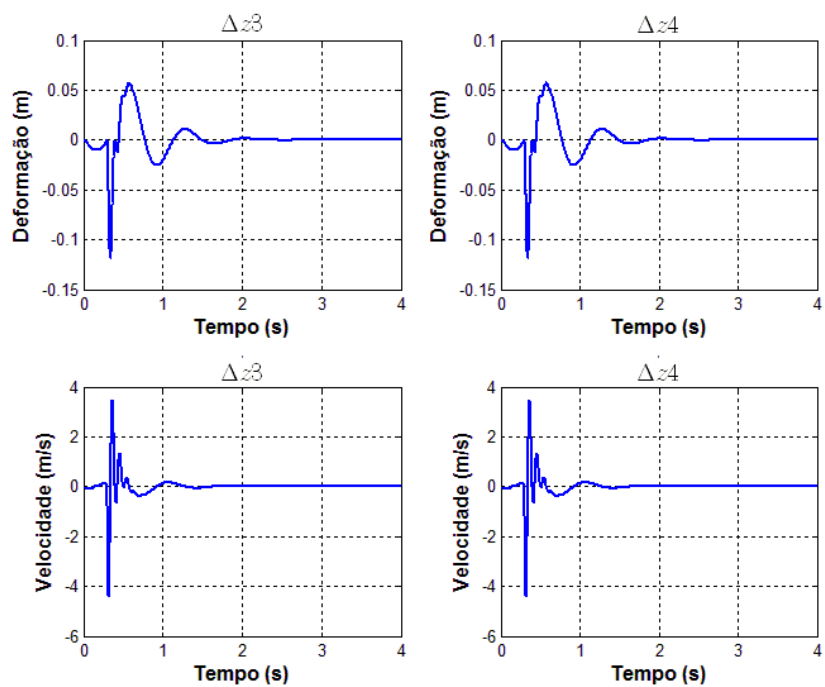


Figura 52 - Deformação e velocidade de deformação das molas traseiras para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

Outra avaliação do modelo foi simulá-lo para uma entrada senoidal. A senóide foi criada, visando representar irregularidades na pista, com comprimento de onda de 15 m e amplitude de 0,1 m. Para poder avaliar o movimento de rolagem, foram impostas senóides defasadas entre as rodas da direita e da esquerda. Os resultados dessa simulação podem ser vistos nos gráficos da Figura 53 à Figura 59.

É possível observar o movimento de rolagem causado pela defasagem da entrada senoidal entre as rodas da direita e da esquerda. Além do gráfico da Figura 55 que evidencia isso é possível notar uma pequena defasagem entre os deslocamentos de z_1 e z_2 e de z_3 e z_4 .

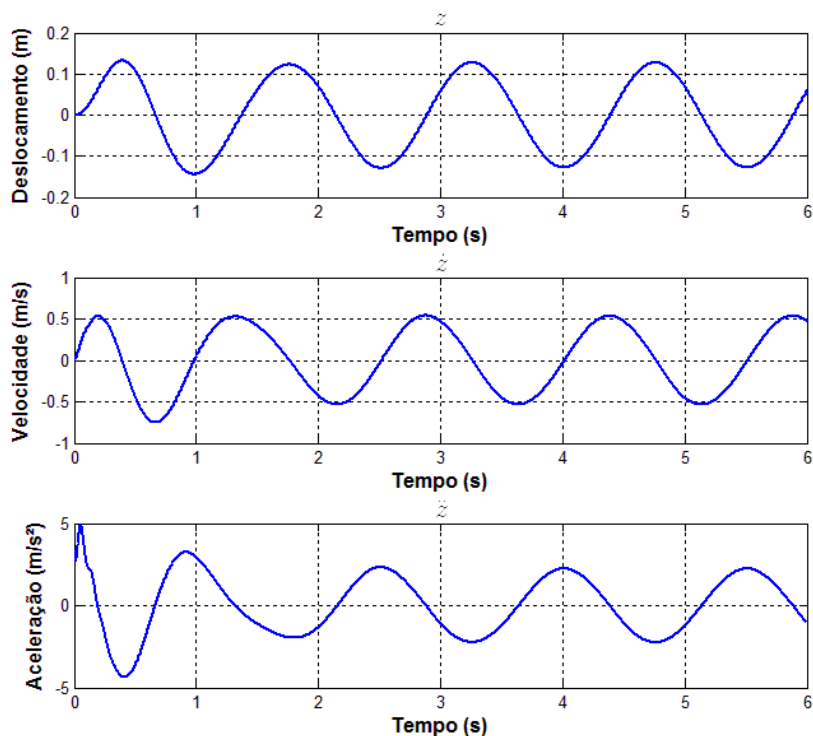


Figura 53 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

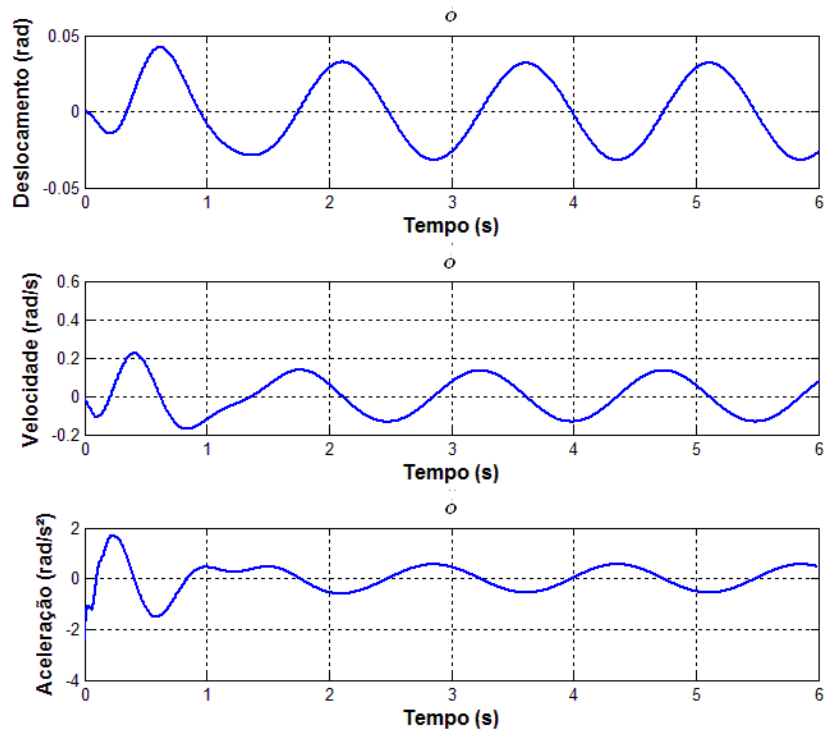


Figura 54 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

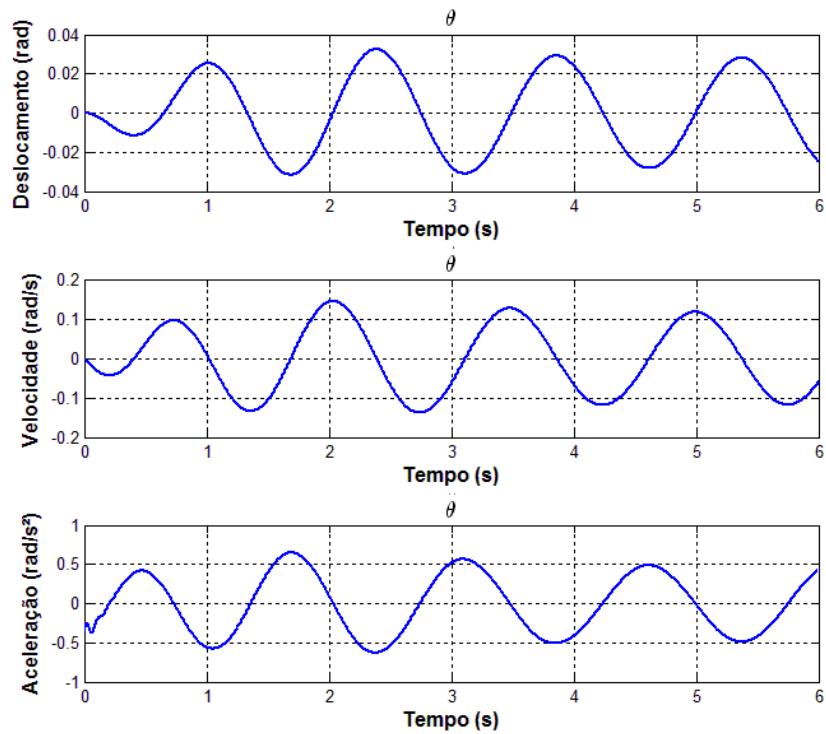


Figura 55 - Deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

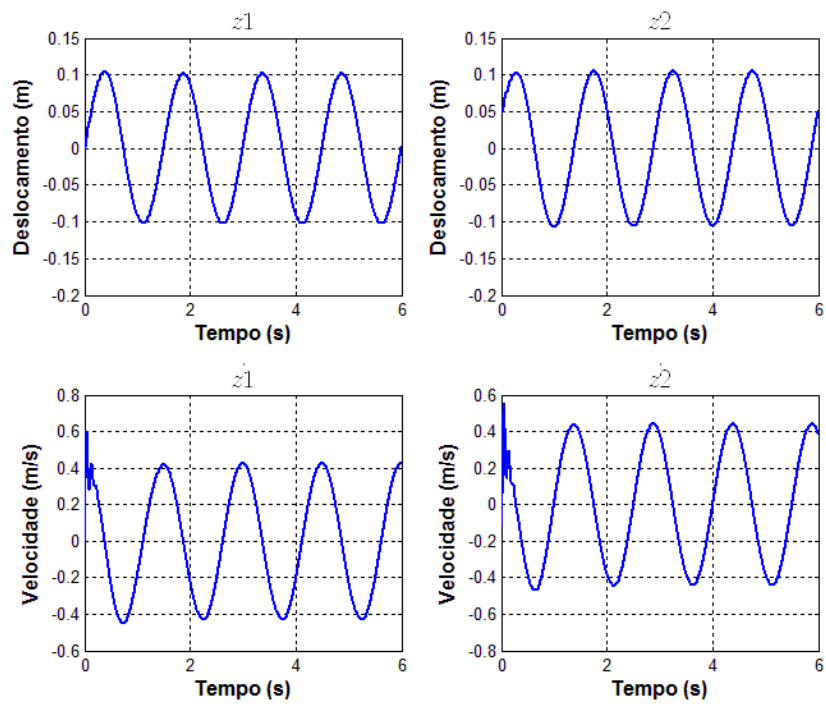


Figura 56 - Deslocamento e velocidade das rodas dianteiras para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

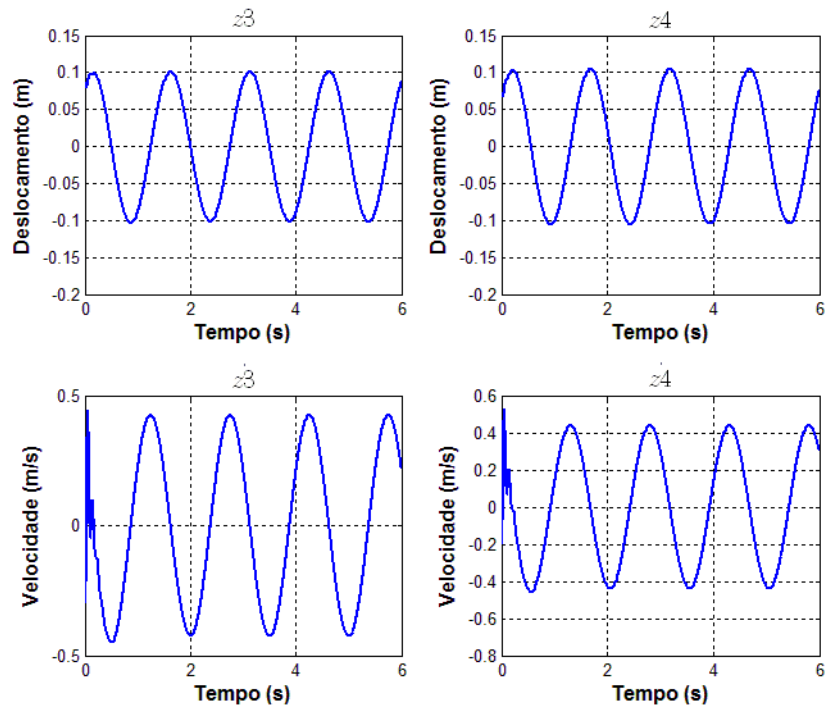


Figura 57 - Deslocamento e velocidade das rodas traseiras para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

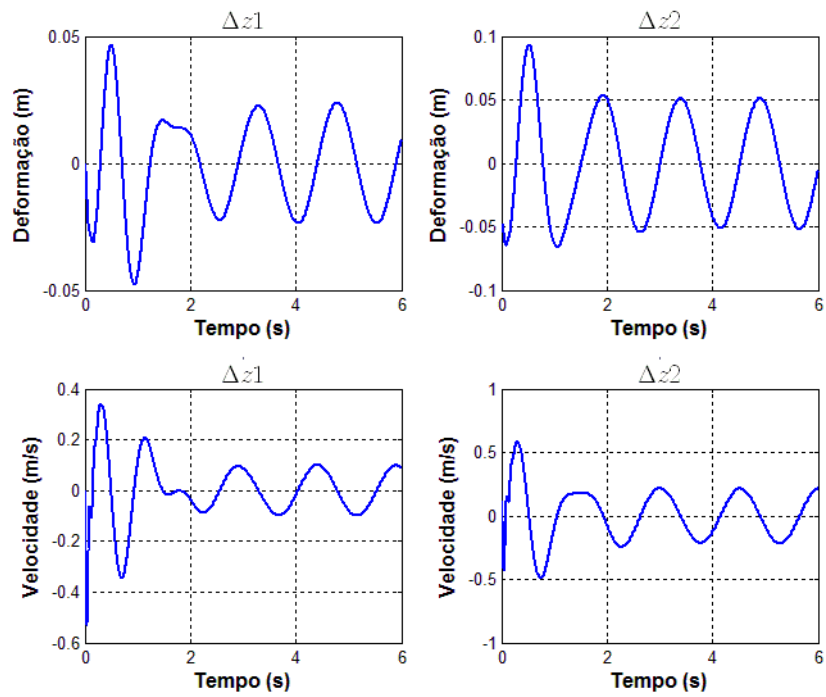


Figura 58 - Deformação e velocidade de deformação das molas dianteiras para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

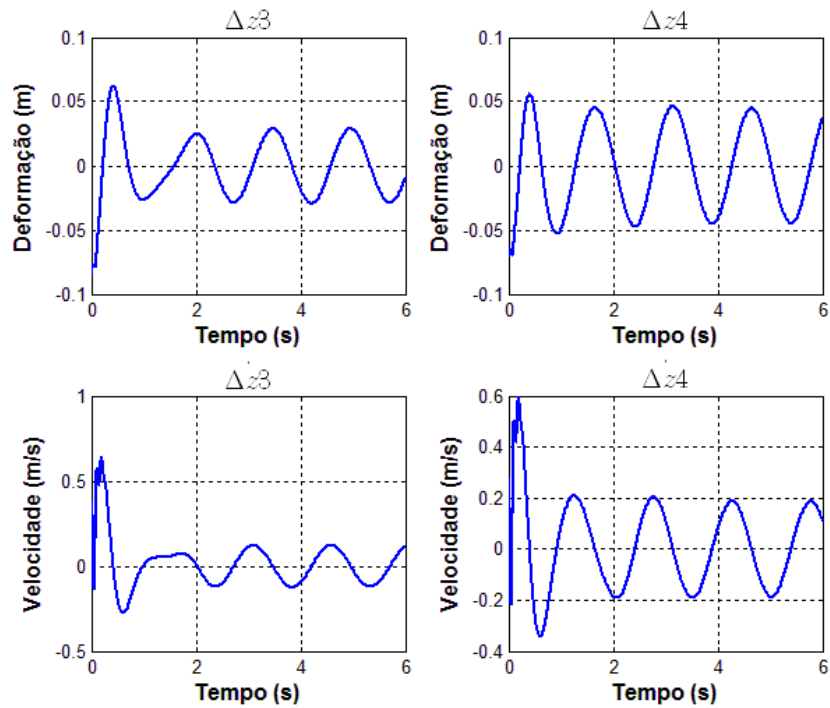


Figura 59 - Deformação e velocidade de deformação das molas traseiras para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

Também foi possível analisar os autovalores (polos do sistema), a frequência de cada um desses polos e o amortecimento. Esses valores estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise modal do sistema do carro completo

Autovalor	Amortecimento	Frequência	
		rad/s	Hz
- 0,782 + 5,3 i	0,146	5,36	0,781
- 0,782 + 5,3 i	0,146	5,36	0,781
-1,64 + 7,61 i	0,211	7,78	1,645
-1,64 + 7,61 i	0,211	7,78	1,645
-2,58 + 9,41 i	0,264	9,76	2,577
-2,58 - 9,41 i	0,264	9,76	2,577
-13,8 – 67,5 i	0,2	68,9	13,812
-13,8 + 67,5 i	0,2	68,9	13,812
-13,7 – 68 i	0,197	69,3	13,661
-13,7 + 68 i	0,197	69,3	13,661
-13,5 – 68,3 i	0,194	69,6	13,495
-13,5 + 68,3 i	0,194	69,6	13,495
-13,3 – 68,6 i	0,191	69,9	13,333
-13,3 + 68,6 i	0,191	69,9	13,333

Analisando os valores obtidos, percebe-se que eles não estão em conformidade com a realidade. A frequência de afundamento e a das rodas teriam que estar na ordem de 10 e 1 Hz, respectivamente, nota-se exatamente o oposto. No entanto, foi obtida uma frequência de pitch próxima da de heave, o que é adequado.

Também foram determinados os autovetores do sistema (colunas da matriz V, apresentada no Anexo A devido às suas dimensões), que indicam os modos de vibrar do sistema.

3.3 Definição da técnica de controle

Para determinar qual técnica seria empregada para sintonizar o sistema de controle foi utilizada uma matriz de decisão (Kaminsky, 2000). Foram avaliadas as três técnicas descritas no item 2.8 de acordo com os seguintes critérios:

- Complexidade de aplicação do método;
- Familiaridade com método;
- Qualidade dos resultados;
- Bibliografia Disponível.

Foi adotada uma ponderação dos critérios de acordo com sua influência em aspectos da gestão de projeto como qualidade, tempo e recursos. A ponderação adotada está exposta na Tabela 9.

Tabela 9 - Ponderação dos critérios na matriz de decisão

Critério	Peso
Complexidade de aplicação do método	3
Familiaridade com método	2
Qualidade dos resultados	3
Bibliografia Disponível	1

A complexidade do método e a qualidade do resultado obtido receberam um peso maior pois foram considerados os critérios de maior influência na qualidade do projeto e nos recursos para seu desenvolvimento. A familiaridade com o método recebeu o segundo maior peso, pois isso pode afetar no tempo gasto para desenvolvimento do projeto do sistema de controle. A bibliografia disponível recebeu o menor peso, pois tem influência semelhante à familiaridade, porém em menor escala.

A partir disso, foi desenvolvida uma matriz de decisão para escolher a técnica a ser aplicada de modo menos subjetivo. Para tanto, foram estabelecidas notas de 1 a 5. A matriz está exposta na Tabela 10.

Tabela 10 - Matriz de decisão

Método	LQG/LTR		LQR		PID	
Complexidade de aplicação	1	3	3	9	3	9
Familiaridade	2	4	3	6	4	8
Qualidade dos resultados	5	15	3	9	2	6
Bibliografia Disponível	4	4	4	4	2	2
	TOTAL	26	TOTAL	28	TOTAL	25

Com base nas notas decidiu-se aplicar a técnica LQR. Percebe-se pelas notas que a técnica LQG/LTR foi penalizada pela sua complexidade e pouca familiaridade que poderiam afetar o cronograma do projeto. Já a técnica PID, apesar de ser mais conhecida, foi penalizada pelo fato de ser aplicada no domínio das frequências para casos SISO, o que afetaria a qualidade do projeto.

3.4 Técnica LQR

O controle linear quadrático visa determinar uma ação de controle $u(t)$ que minimize um índice de desempenho linear quadrático (ou objetivo), J , sujeito às restrições do problema, descrito na equação (3.43).

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3.43)$$

onde, Q é a matriz de ponderação dos estados, $n \times n$, é sempre semi-definida positiva e R é a matriz de ponderação do controle, $m \times m$, definida positiva.

A tentativa no presente projeto consiste, portanto em encontrar a lei de controle $u(x,t)$ que minimize a função objetivo. Para tanto, utiliza-se a equação (3.44).

$$u(x, t) = -k_{LQ} x(t) \quad (3.44)$$

A solução para tal problema é dada pela Equação Diferencial de Ricatti, descrita na equação (3.45).

$$-PA - A^T P + PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3.45)$$

Tendo conhecimento de P entre t_0 e t_f é possível implementá-la na lei de controle, obtendo a equação (3.46).

$$k_{LQ}(t) = R^{-1}B^T P(t) \quad (3.46)$$

3.5 Observador de estados

Um observador de estados consiste em um algoritmo colocado na malha de realimentação que é capaz de gerar uma estimativa do estado completo baseado nas q medidas de $y(t)$ e nas m variáveis de $u(t)$. No caso foi utilizado o observador de ordem plena que consiste em algoritmo que gera estimativas de todas as variáveis do sistema a partir das medições.

O projeto do observador de estado consiste em fazer com que a matriz de ganhos do observador, k_{obs} , leve o erro de observação para zero, o mais rápido possível. O erro do observador é dado pela equações (3.47) e (3.48) onde $z(t)$ é a estimativa do estado. A dinâmica do observador é dada pela equação (3.49).

$$e(t) = z(t) - x(t) \quad (3.47)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{z}(t) - \dot{x}(t) \quad (3.48)$$

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + k_{obs}[y(t) - Cz(t)] \quad (3.49)$$

A partir disso, obtém-se a equação (3.50). Para determinar o ganho do observador é feita uma alocação dos polos do observador que devem ficar preferencialmente à esquerda dos polos do sistema no semi-plano esquerdo.

$$\dot{e}(t) = (A - k_{obs}C)e(t) \quad (3.50)$$

3.6 Projeto do Controlador

Foram aplicadas as técnicas descritas nos itens 3.4 e 3.5 para projetar o sistema de controle da suspensão. As técnicas foram aplicadas inicialmente para os 3 modelos desenvolvidos: ¼ de carro, ½ carro e carro completo.

3.6.1 Controlador para o modelo de ¼ de carro

Primeiramente, foi feita a análise de controlabilidade, que foi garantida para o sistema. Então, foram adotadas as matrizes Q e R a seguir para o projeto do controlador.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 80 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$R = [5] \quad (3.52)$$

A partir de (3.51) e (3.52) é possível perceber que foi adotada uma ponderação entre os estados que prioriza as velocidades. Além disso, percebe-se que foi priorizada a precisão do controle sobre a economia de energia, uma vez que $Q > R$.

Os estados a serem medidos pelos sensores eram o curso da suspensão e o a velocidade de deslocamento vertical da massa suspensa. Desse modo, a matriz C do sistema ficou:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Uma vez que a observabilidade do sistema pode ser garantida, foi projetado o observador de estados de ordem plena. Para tanto foram adotados polos maiores que os do sistema, visto que o observador deve ter sua dinâmica mais rápida para zerar o erro. Além disso, foi adotado um erro inicial de 10% para os estados estimados pelo observador.

O atuador foi representado como uma entrada de força (Crivellaro, 2008). Assim, o modelo fica como o representado na Figura 60. Assim, mantém-se um amortecimento constante e a força variável é representada pela força F1 adicionada no modelo.

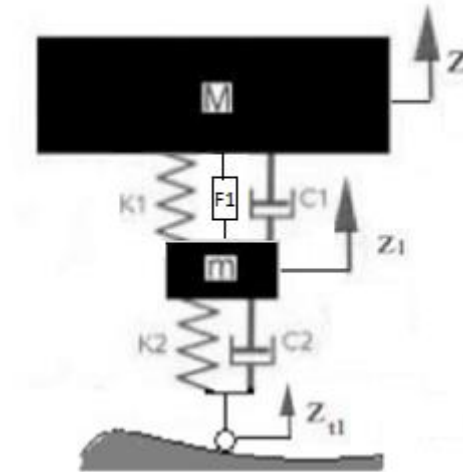


Figura 60 - Modelo de ¼ de carro controlado. Adaptado de (Junior, 2006; Barbosa, 2011)

Foram desenvolvidas simulações para comparar os resultados do sistema controlado com o sistema original sem controle. Os resultados podem ser vistos no item 4.1.

3.6.2 Controlador para o modelo de ½ carro

Foi feita a análise de controlabilidade para o sistema, considerando as variáveis que seriam afetadas pela força gerada pelo atuador. Uma vez garantida a controlabilidade foram definidas as matrizes Q e R para o projeto do controlador. Os valores adotados foram:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 80 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Percebe-se que foi adotado um critério semelhante ao do caso anterior, priorizando as velocidades, principalmente da massa suspensa (linear e angular) e a qualidade do controle. Vale notar na matriz R que a suspensão dianteira e traseira receberam o mesmo peso.

Os estados medidos foram: o curso das suspensões, o ângulo e a velocidade angular de arfagem e a velocidade da massa suspensa. Desse modo, a matriz C ficou:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -a_1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & a_2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Uma vez que a observabilidade do sistema pode ser garantida, foi projetado o observador de estados de ordem plena. Para tanto foram adotados polos maiores que os do sistema. Além disso, foi adotado um erro inicial de 10% para os estados estimados pelo observador.

Assim como no caso de ¼ de carro, os atuadores foram representados como entradas de força (Crivellaro, 2008). Assim, o modelo fica como o representado na Figura 61. Assim, mantém-se um amortecimento constante e a força variável é representada pelas forças F1 e F2 adicionadas no modelo.

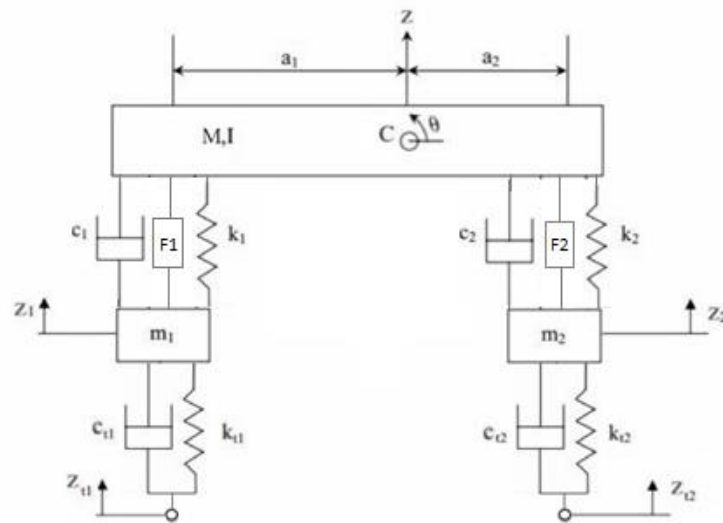


Figura 61 - Modelo de ½ carro controlado. Adaptado de (Bayrakdar, 2010)

Foram desenvolvidas simulações para comparar os resultados do sistema controlado com o sistema original sem controle. Os resultados podem ser vistos no item 4.2.

3.6.3 Controlador para o modelo de carro completo

Também foi feita a análise de controlabilidade para o sistema, considerando as variáveis que seriam afetadas pela força gerada pelo atuador. Uma vez garantida a controlabilidade foram definidas as matrizes Q e R para o projeto do controlador. Os valores adotados foram:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Percebe-se que foi adotado um critério semelhante ao dos casos anteriores, priorizando as velocidades, principalmente da massa suspensa (linear e angulares) e a qualidade do controle. Vale notar na matriz R que as suspensões de cada roda receberam o mesmo peso.

Os estados medidos foram: o curso das suspensões, o ângulo e a velocidade angular de arfagem e de rolagem e a velocidade da massa suspensa. Desse modo, a matriz C ficou:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & b_1 & 0 & a_1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -b_2 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & b_1 & 0 & -a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -b_2 & 0 & -a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Uma vez que a observabilidade do sistema pode ser garantida, foi projetado o observador de estados de ordem plena. Para tanto foram adotados polos maiores que os do sistema. Além disso, foi adotado um erro inicial de 10% para os estados estimados pelo observador.

Assim como nos casos anteriores, os atuadores foram representados como entradas de força (Crivellaro, 2008). Assim, o modelo fica como o representado na Figura 62. Assim, mantém-se um amortecimento constante e a força variável é representada pelas forças F_1 a F_4 adicionadas no modelo.

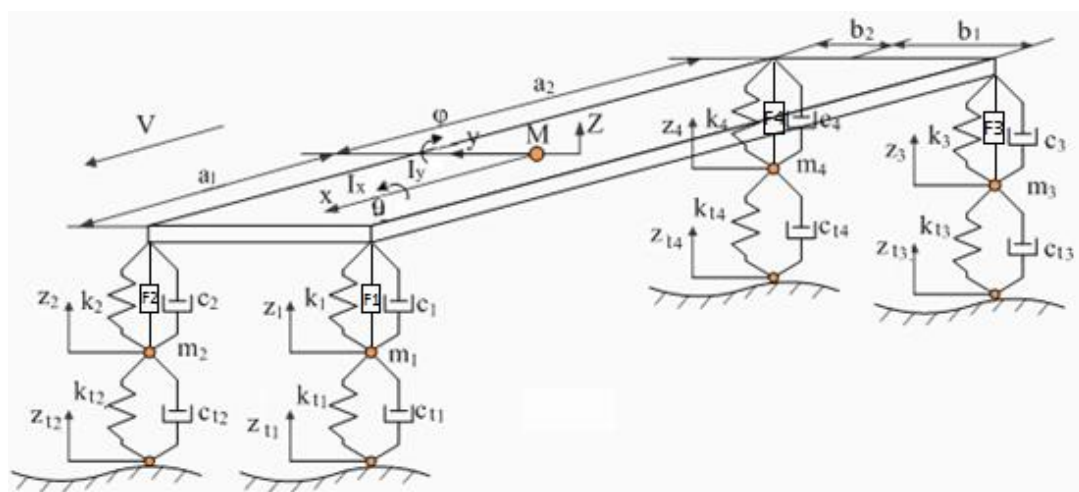


Figura 62 - Modelo de 1/2 carro controlado. Adaptado de (Bayrakdar, 2010)

Foram desenvolvidas simulações para comparar os resultados do sistema controlado com o sistema original sem controle. Os resultados podem ser vistos no item 4.3.

3.7 Perfil de estrada

A fim de avaliar o sistema de controle projetado, além das simulações com entradas típicas como senóide e degrau, foi gerado um perfil aleatório de estrada, utilizando os conceitos apresentados no item 2.6.

Para geração dos perfis foi adotado um comprimento de 250 metros e as frequências espaciais variam de 0,004 ciclos/m a 4 ciclos/m.

Foram gerados três perfis, representando três classes de estrada, de acordo com a norma ISO 8608. Foram geradas estradas classe A (Figura 63), classe D (Figura 64) e classe G (Figura 65). Em todos os casos, foi considerado o limite superior fornecido na Tabela 2.

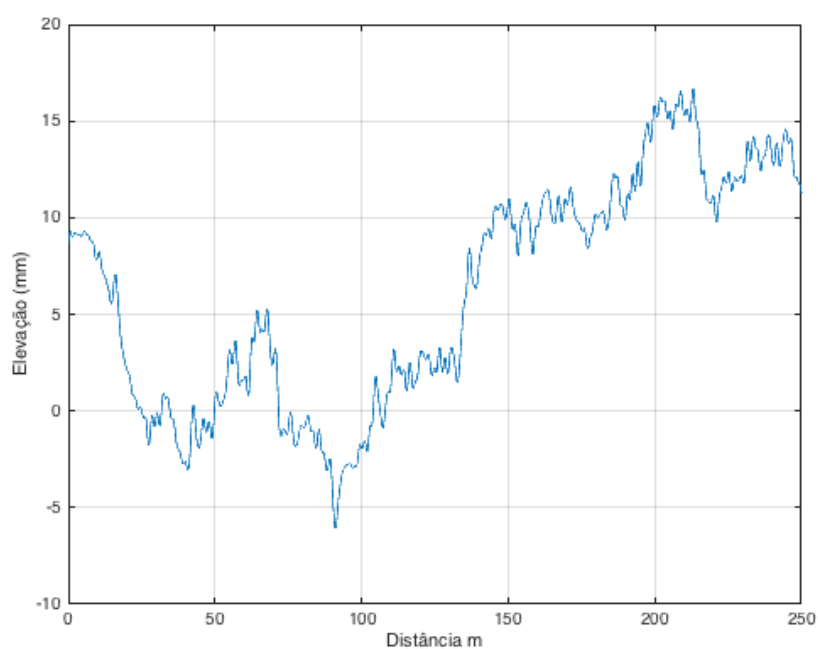


Figura 63 - Exemplo de perfil de elevação para uma estrada classe A

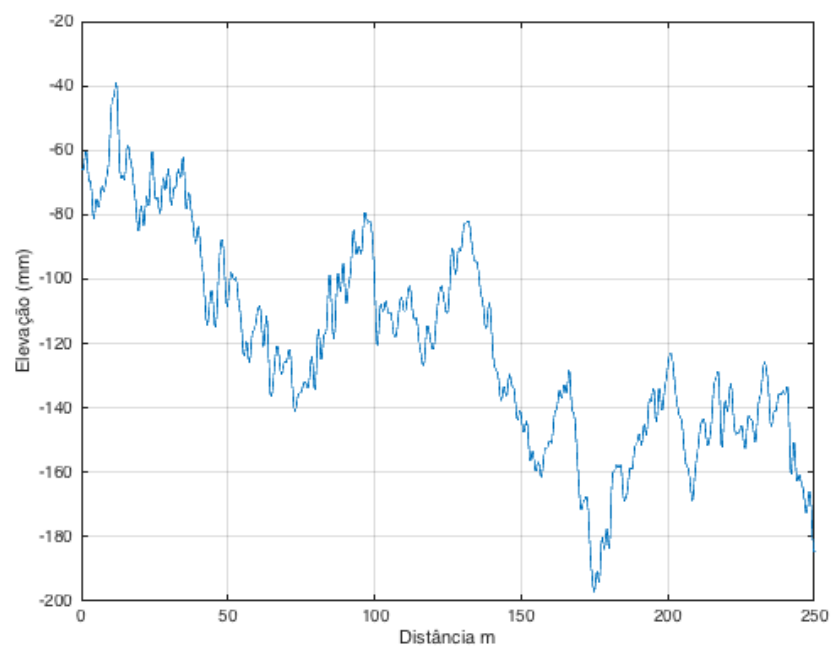


Figura 64 - Exemplo de perfil de elevação para uma estrada classe D

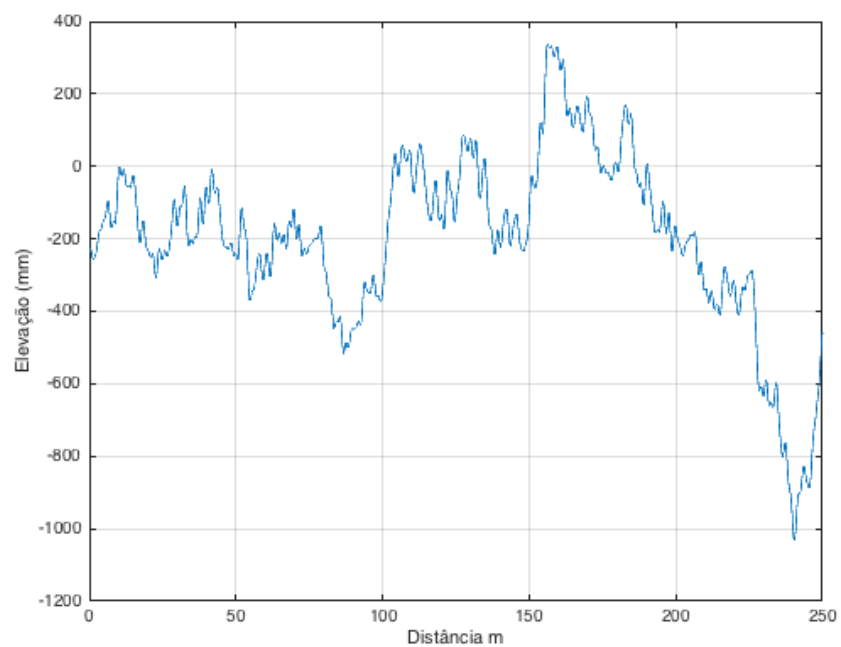


Figura 65 - Exemplo de perfil de elevação para uma estrada classe G

É possível perceber o aumento da amplitude das irregularidades do perfil A para o perfil G. Assim, percebe-se que a suspensão é muito mais exigida com a piora da qualidade da pista.

4 Resultados

Tendo conhecimento dos parâmetros, dos modelos do sistema e do sistema de controle elaborado, foi possível elaborar simulações numéricas com auxílio de um software computacional. Foram simulados o sistema original e o sistema controlado para entrada degrau e entrada senoidal. Essas estradas são simples e costumam ser usadas para avaliar sistemas de controle. Além disso, foram simulados três perfis de estrada de classe A, D e G, conforme a norma ISO 8608. Por fim, foram avaliadas as acelerações sob o ponto de vista de conforto, de acordo com a norma ISO 2631.

4.1 Modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

4.1.1 Entrada degrau

Inicialmente, foram elaboradas simulações da resposta dos sistemas original e controlado para uma entrada degrau de 0,1 metro. Na Figura 66, na Figura 67 e na Figura 68 é possível comparar o resultado do sistema controlado (em vermelho) e do sistema não controlado (em azul).

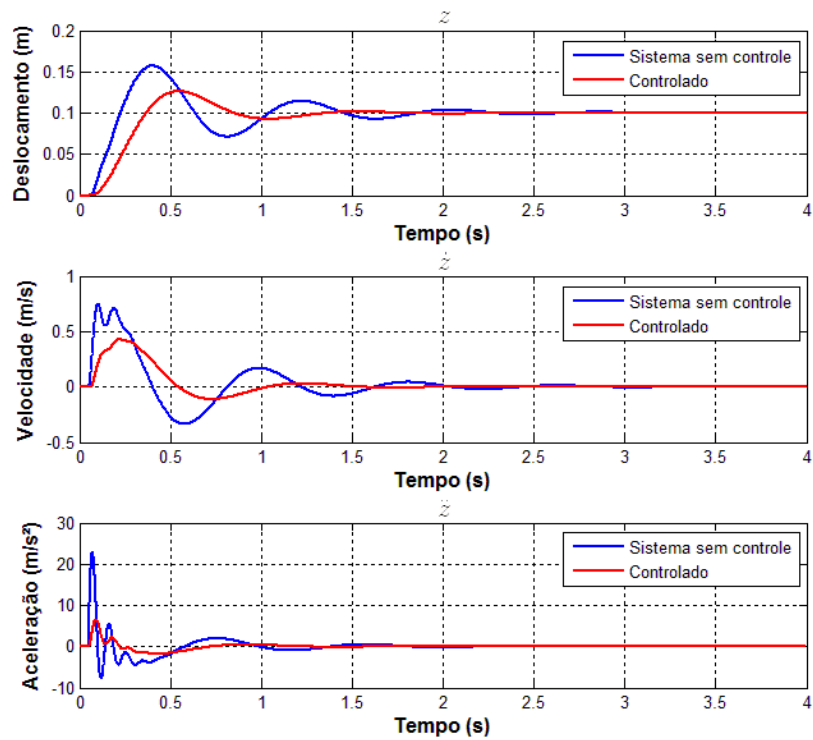


Figura 66 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

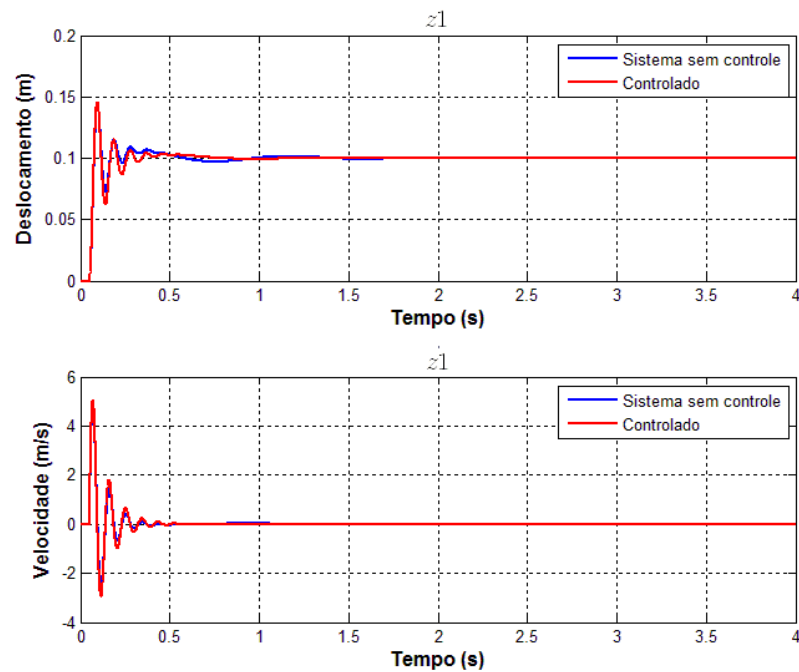


Figura 67 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

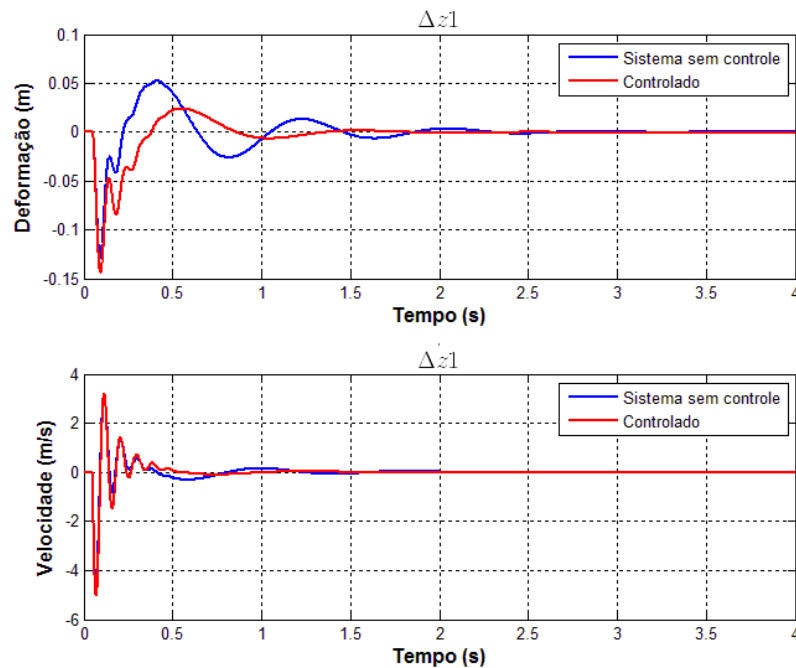


Figura 68 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

É possível notar um ganho de conforto. Os deslocamentos, velocidades e acelerações foram suavizados e reduziram de intensidade. Percebe-se uma redução da ordem de 60% da original no primeiro pico de aceleração, o que representa uma melhora significativa no conforto dos ocupantes. O comportamento da massa não suspensa e da deflexão da mola foram pouco alterados.

4.1.2 Entrada senoidal

Também foram elaboradas simulações da resposta dos dois sistemas para uma entrada senoidal igual a utilizada anteriormente para verificação do modelo. Na Figura 69, na Figura 70 e na Figura 71 é possível comparar o resultado do sistema controlado (em vermelho) e do sistema não controlado (em azul).

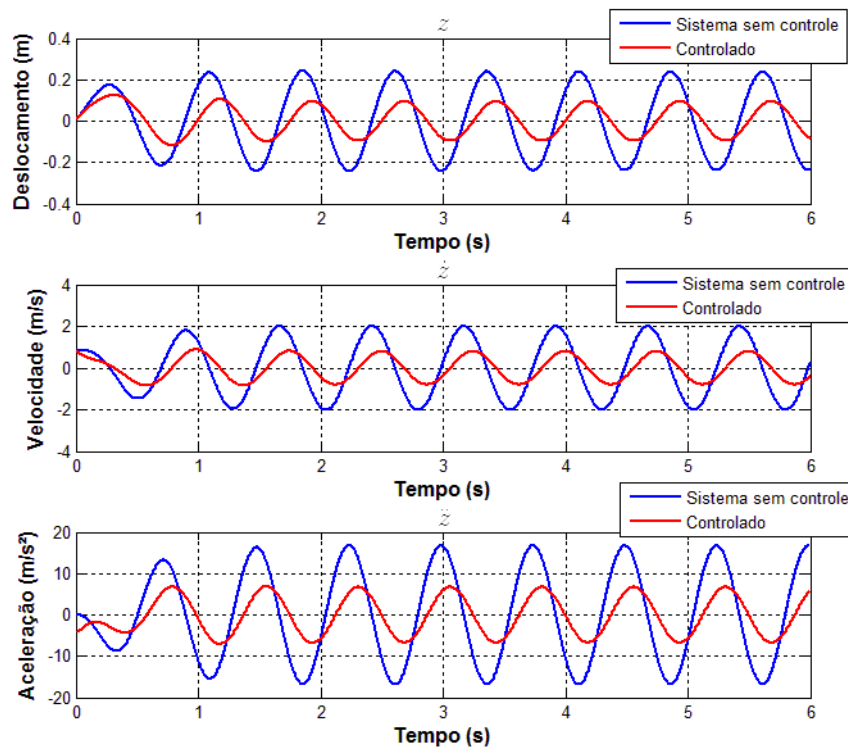


Figura 69 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de ¼ de carro

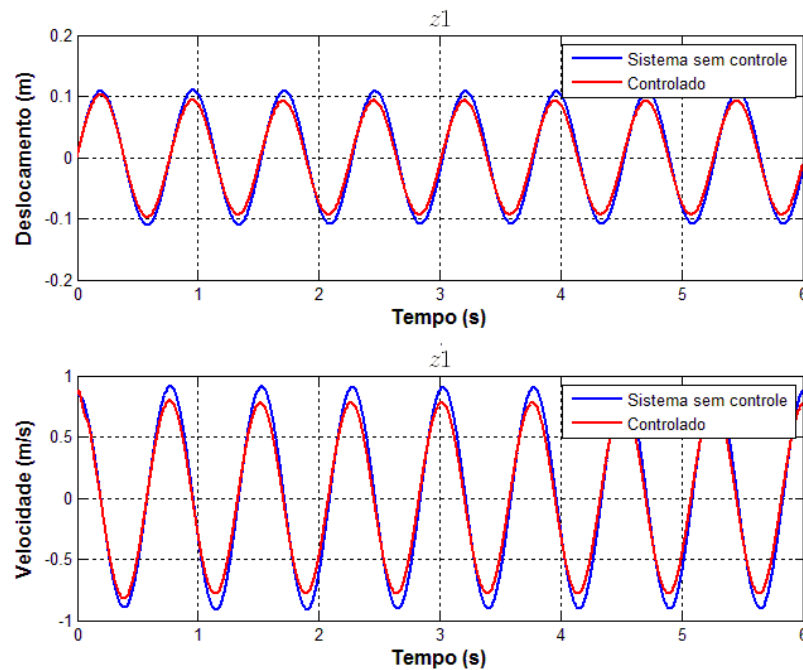


Figura 70 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de ¼ de carro

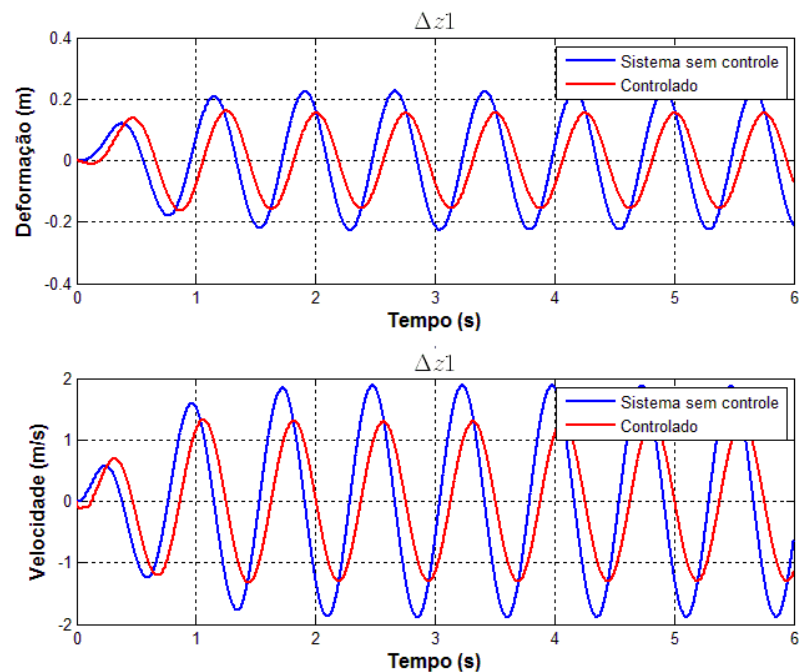


Figura 71 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de ¼ de carro

Também é perceptível o ganho de conforto para essa simulação. Os deslocamentos, velocidades e acelerações da massa suspensa reduziram de intensidade. Percebe-se uma redução de aproximadamente 50% da aceleração, o que representa um ganho significativo de conforto para ocupantes. O comportamento da massa não suspensa e da deflexão da mola foram pouco alterados, mas percebe-se uma redução na deflexão da mola e uma menor oscilação da massa não suspensa.

4.1.3 Estrada classe A

Para possibilitar uma análise mais realista do sistema de controle foram feitas simulações com perfis de elevação de estrada de acordo com a norma ISO 8608. Inicialmente, simulou-se os dois modelos para uma estrada classe A. A Figura 72 traz o perfil utilizado como entrada nos sistemas. A Figura 73, a Figura 74 e a Figura 75 trazem os resultados das simulações.

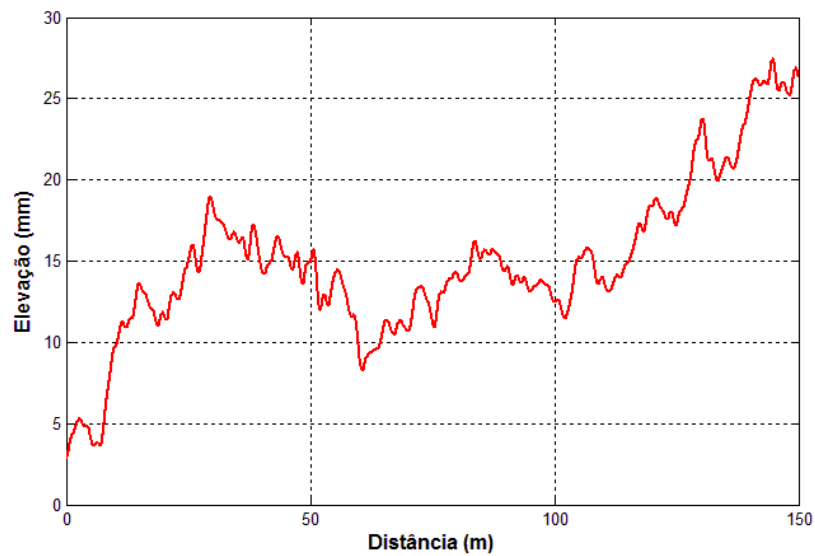


Figura 72 - Perfil de elevação da estrada classe A usada na simulação de ¼ de carro

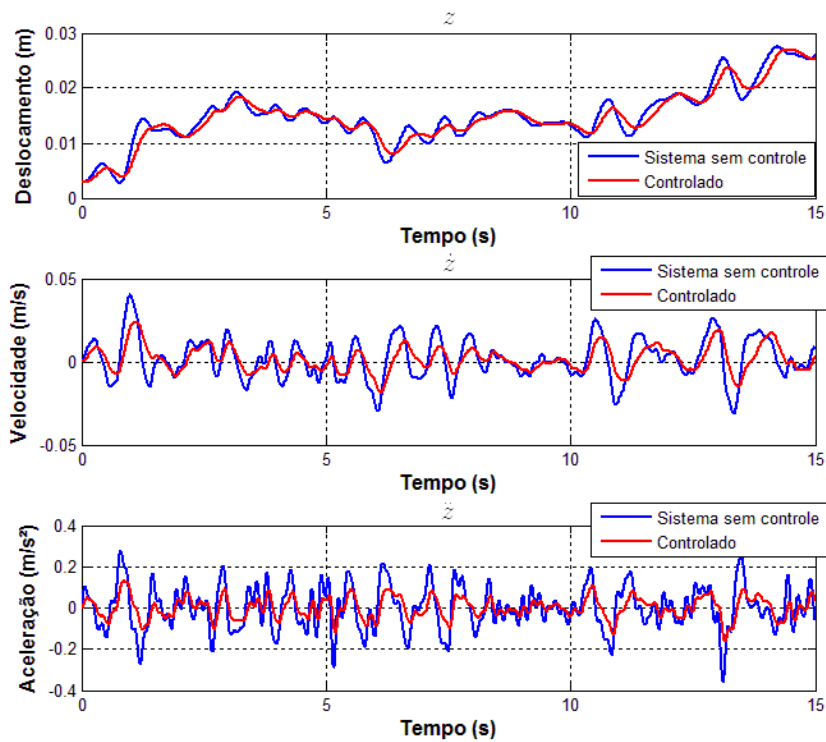


Figura 73 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de ¼ de carro

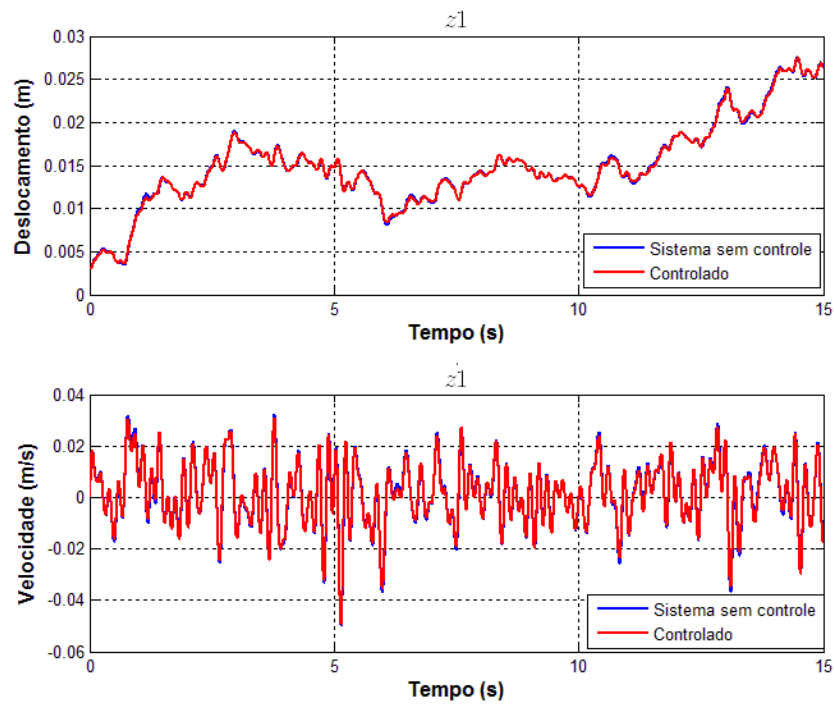


Figura 74 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

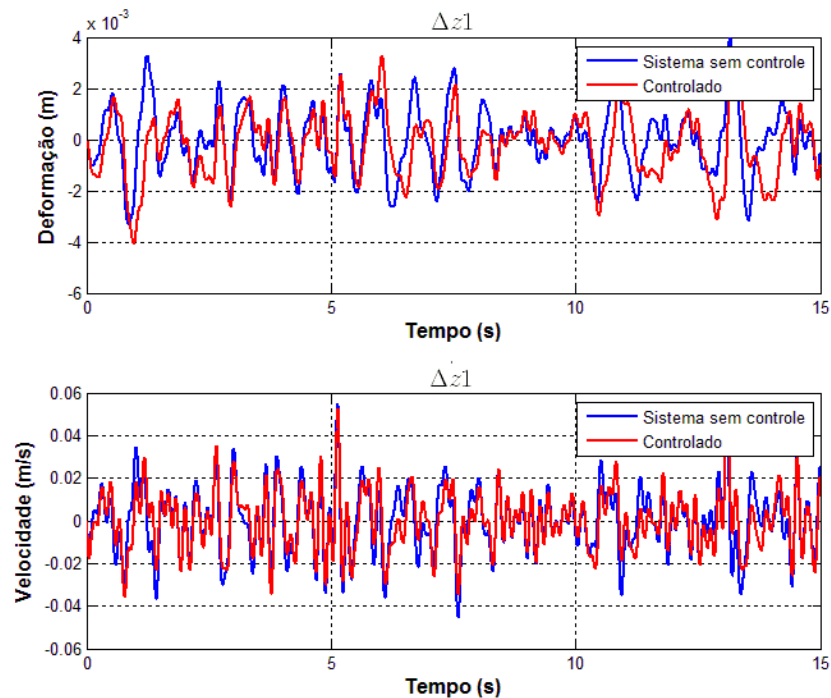


Figura 75 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

É possível notar que assim como nas outras simulações houve uma redução no nível de aceleração da massa suspensa. Esse fato, somado à suavização do perfil de elevação e de velocidade a que o ocupante estaria sujeito provocam um grande ganho de conforto. O comportamento da massa não suspensa e da deformação da mola foram pouco alterados.

Foram também aplicados os métodos descritos no item 2.3 da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe A para o modelo de ¼ de carro

	Modelo Original	Modelo Controlado
a_w (m/s ²)	0,06891	0,03119
MTVV (m/s ²)	0,0931	0,04362
VDV (m/s ^{1,75})	0,1817	0,0829

Como a estrada utilizada como base para a simulação está dentro da classe melhor avaliada, nota-se que as vibrações geradas não são desconfortáveis para nenhum dos modelos. No entanto, fica evidente a melhora do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu em aproximadamente 50% para todos os tipos de análise.

4.1.4 Estrada classe D

O mesmo procedimento foi repetido para uma estrada classe D. A Figura 76 mostra o perfil de elevação da estrada utilizada para a simulação. A Figura 77, a Figura 78 e a Figura 79 mostram os resultados das simulações.



Figura 76 - Perfil de elevação da estrada classe D usada na simulação de ¼ de carro

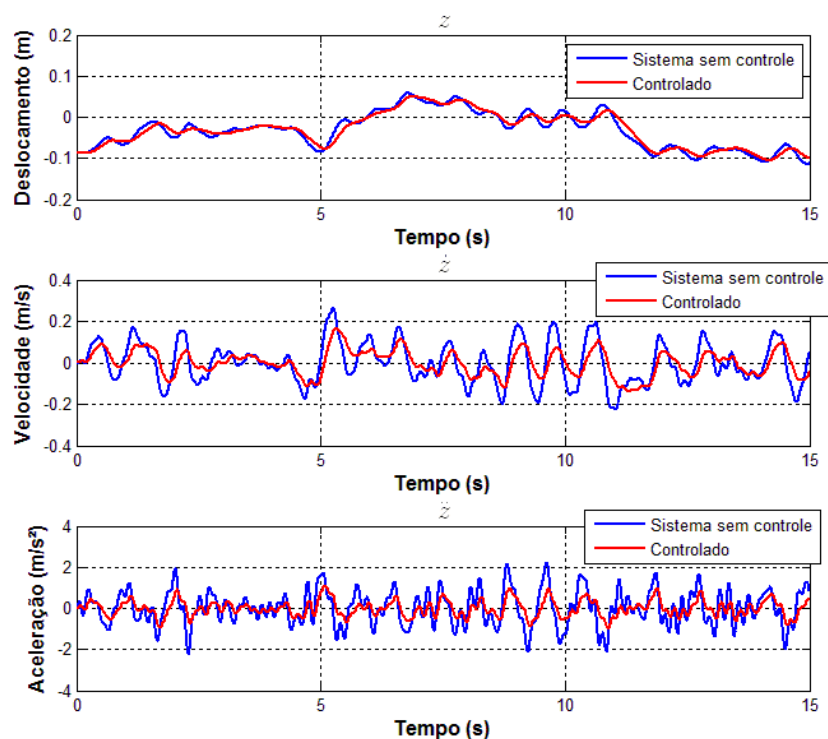


Figura 77 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de ¼ de carro

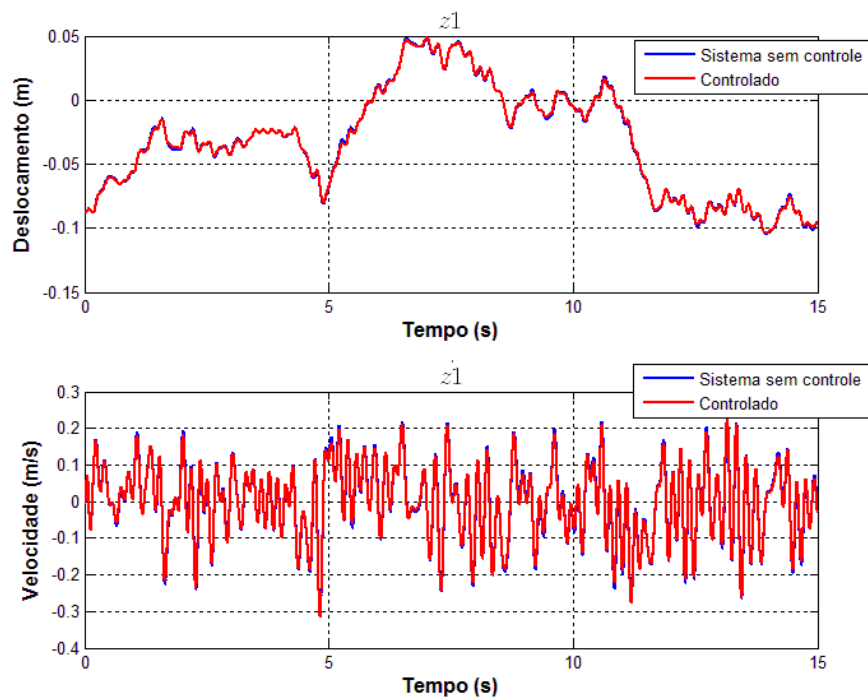


Figura 78 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

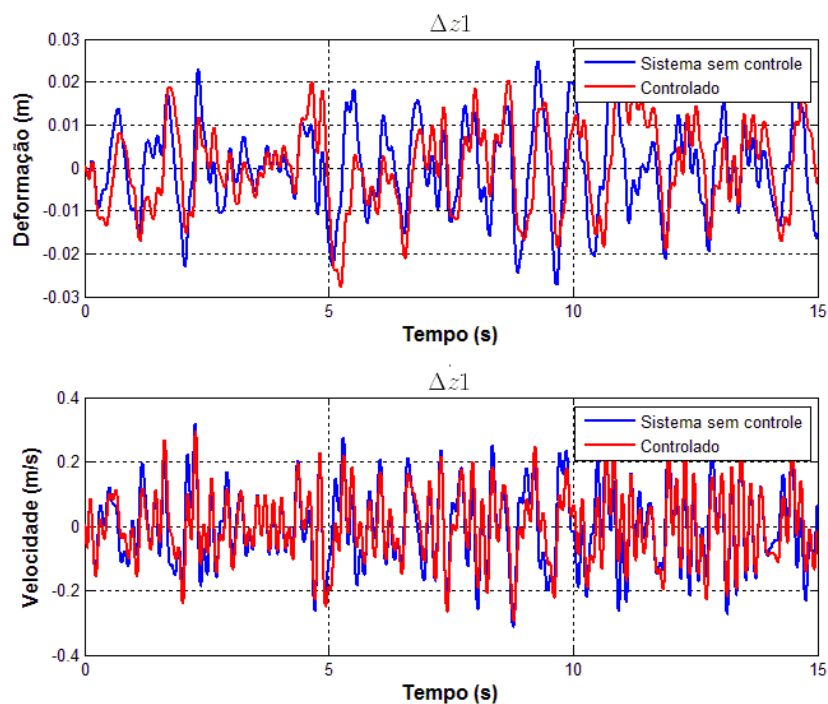


Figura 79 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

Nota-se que assim como nas outras simulações houve uma redução no nível de aceleração da massa suspensa. Também fica evidente a redução na velocidade a que o ocupante estaria sujeito, provocando um grande ganho de conforto. O comportamento da massa não suspensa e da deformação da mola foram pouco alterados. As simulações apresentam o mesmo comportamento que para o caso da estrada classe A.

Foram também aplicados os métodos descritos no item 2.3 da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 12.

Tabela 12 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe D para o modelo de ¼ de carro

	Modelo Original	Modelo Controlado
a_w (m/s ²)	0,5744	0,2439
MTVV (m/s ²)	0,6858	0,289
VDV (m/s ^{1,75})	1,496	0,6318

Nesse caso, a estrada utilizada como base para a simulação gera valores que estão na faixa de levemente desconfortáveis para o modelo original. No caso do modelo controlado fica evidente a melhora do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu em aproximadamente 50% para todos os tipos de análise, se mantendo na faixa não desconfortável.

4.1.5 Estrada classe G

O mesmo procedimento foi repetido para uma estrada classe G. A Figura 80 mostra o perfil de elevação da estrada utilizada para a simulação. A Figura 81, a Figura 82 e a Figura 83 mostram os resultados das simulações.

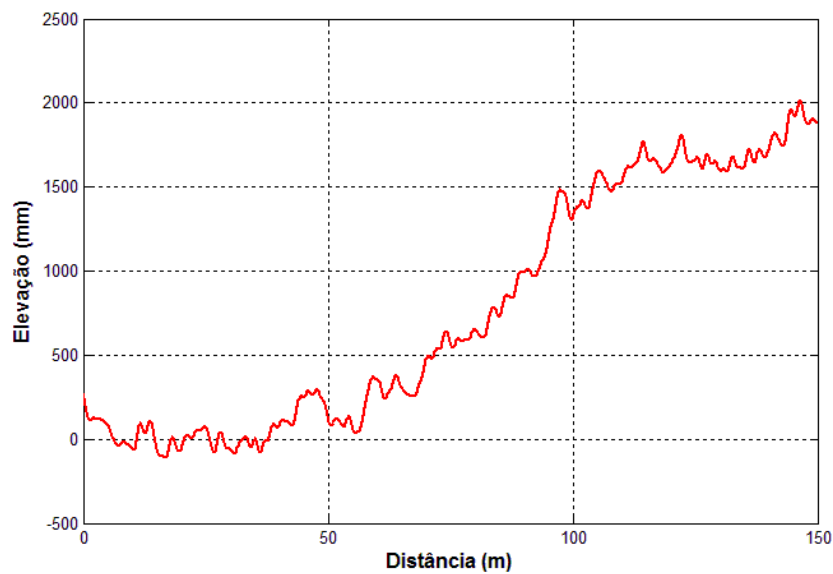


Figura 80 - Perfil de elevação da estrada classe G usada na simulação de ¼ de carro

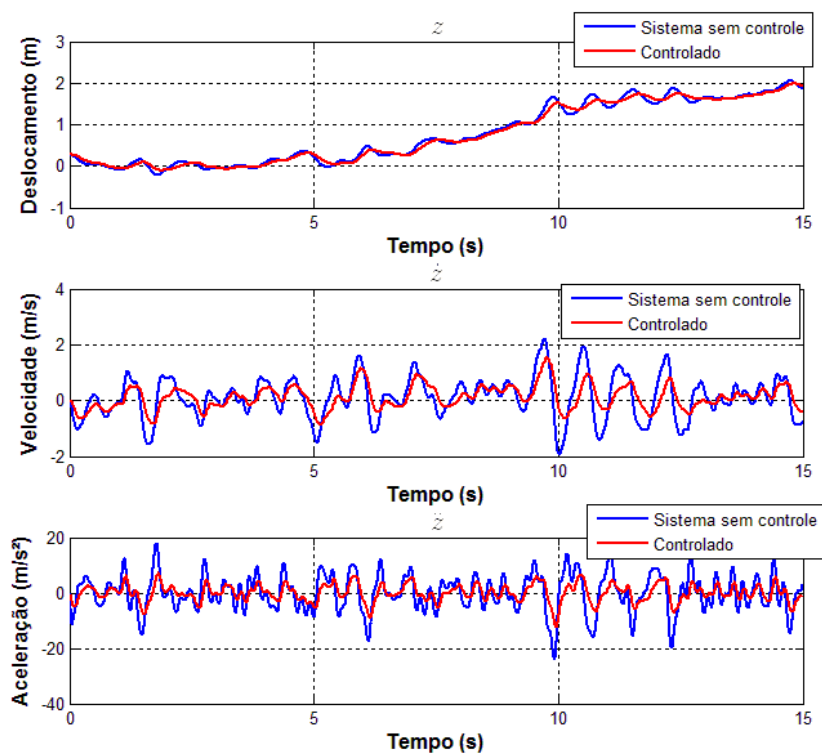


Figura 81 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de ¼ de carro

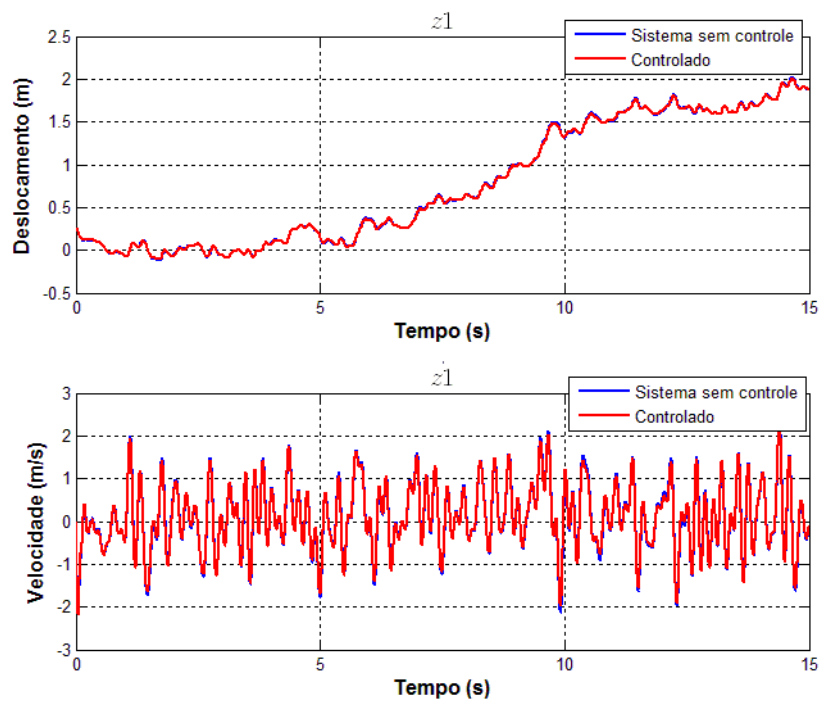


Figura 82 - Comparação do deslocamento e velocidade da massa não suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

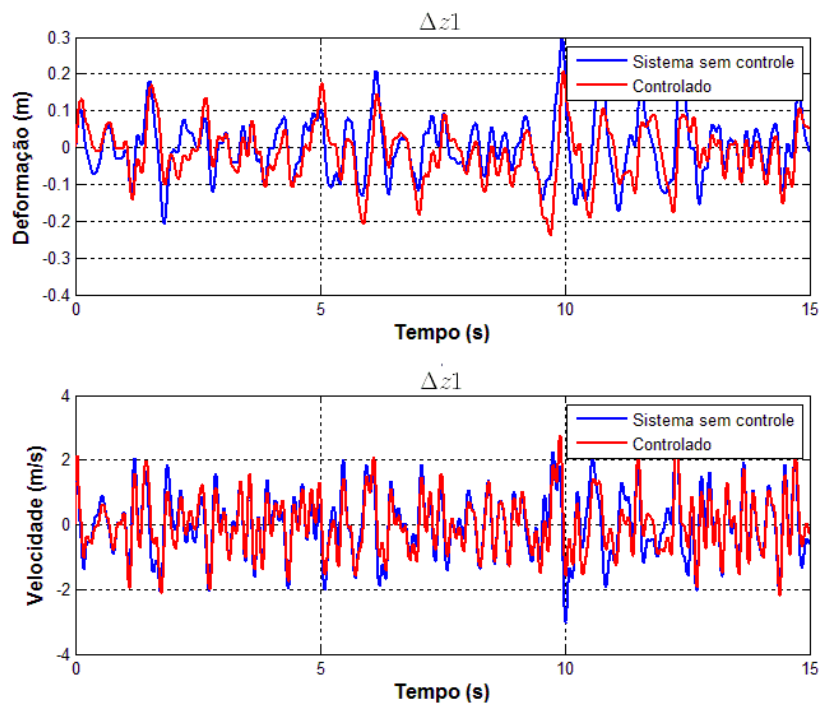


Figura 83 - Comparação da deflexão da mola e da velocidade de deflexão da mola entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro

Assim como nas outras simulações houve uma redução no nível de aceleração da massa suspensa. O comportamento da massa não suspensa e da deformação da mola foram pouco alterados. As simulações apresentam o mesmo comportamento que para o caso da estrada classe A e D.

Foram também aplicados os métodos descritos no item 2.3 da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe G para o modelo de ¼ de carro

	Modelo Original	Modelo Controlado
a_w (m/s ²)	4,412	1,959
MTVV (m/s ²)	5,593	2,69
VDV (m/s ^{1,75})	11,73	5,259

A estrada simulada nesse caso é extremamente acidentada e gera valores extremamente desconfortáveis para o modelo original. No caso do modelo controlado há uma melhora significativa do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu em aproximadamente 50% para todos os tipos de análise, mas ainda assim permanece na faixa desconfortável.

4.2 Modelo de ½ carro

4.2.1 Entrada degrau

O mesmo procedimento foi aplicado para o modelo de ½ carro. Foram elaboradas simulações da resposta dos sistemas original e controlado para uma entrada degrau de 0,1 metro. Os gráficos da Figura 84 à Figura 87 mostram os resultados do sistema controlado (em vermelho) e do sistema não controlado (em azul).

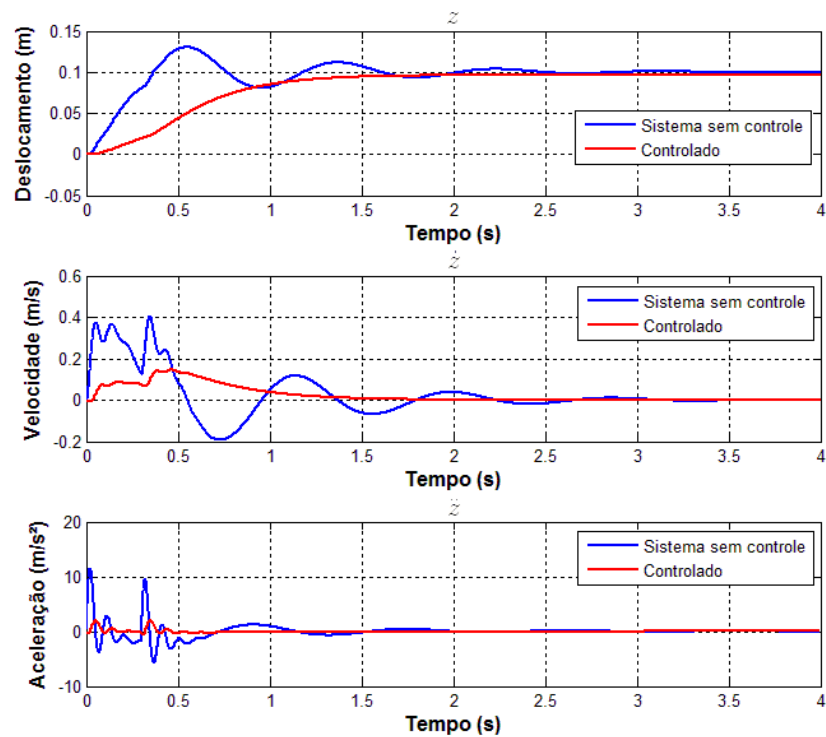


Figura 84 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

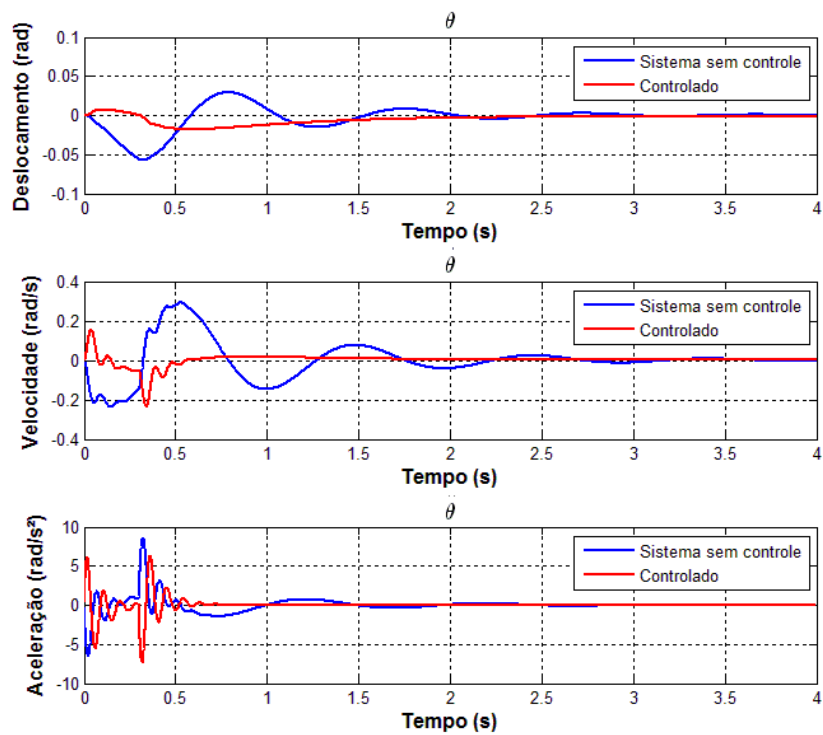


Figura 85 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

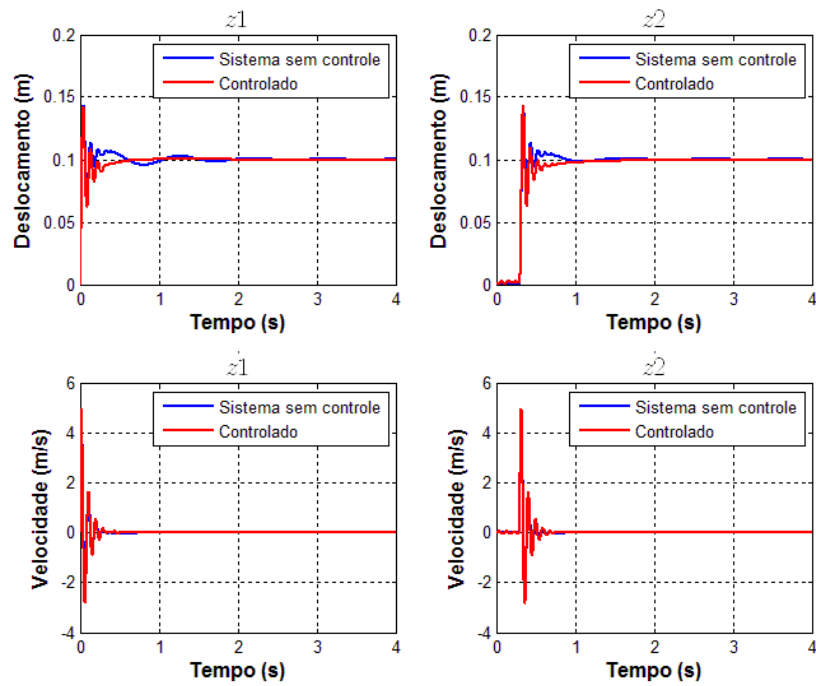


Figura 86 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

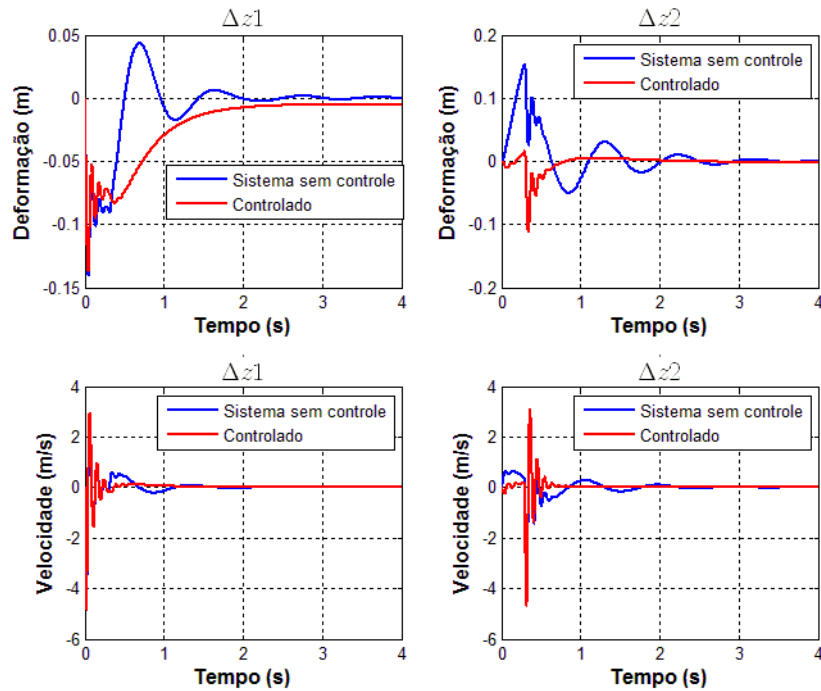


Figura 87 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

Os deslocamentos, velocidades e acelerações verticais foram suavizados e reduziram de intensidade. Percebe-se uma redução da ordem de 80% da original no primeiro pico de aceleração, o que representa uma melhora significativa no conforto dos ocupantes. No entanto, o comportamento angular foi modificado de maneira diferente. Os deslocamentos e velocidades foram reduzidos, mas não houve grande redução na aceleração. O comportamento da massa não suspensa foi pouco alterado. O comportamento das molas, principalmente a traseira foi modificado.

4.2.2 Entrada Senoidal

Seguindo o mesmo procedimento que para o modelo de $\frac{1}{4}$ de carro, também foram elaboradas simulações da resposta dos dois sistemas para uma entrada senoidal. A senóide utilizada foi igual à utilizada anteriormente para verificação do modelo. Os gráficos da Figura 88 à Figura 91 mostram os resultados das simulações do sistema controlado (em vermelho) e do sistema não controlado (em azul).

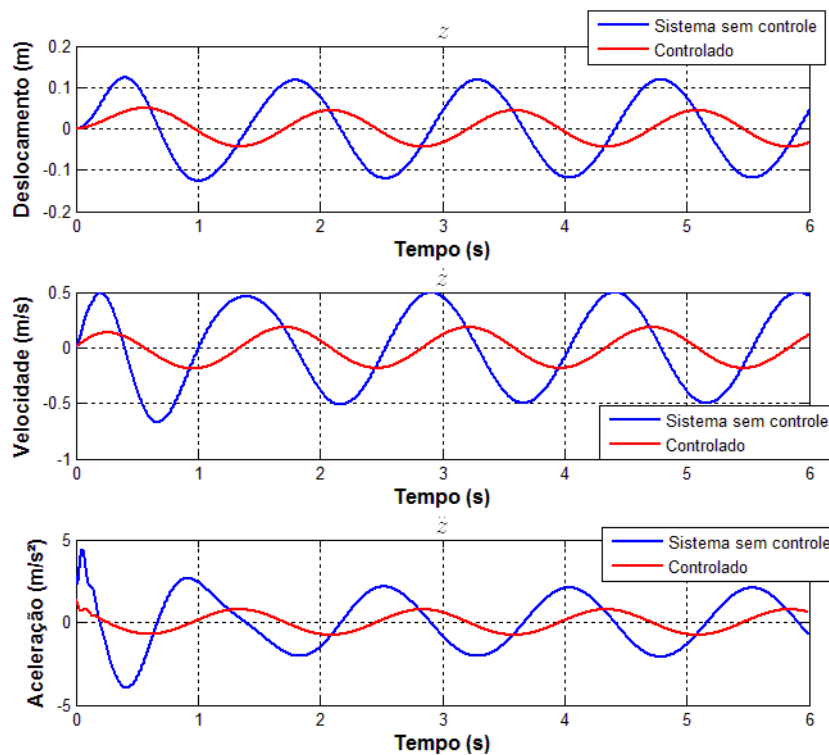


Figura 88 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

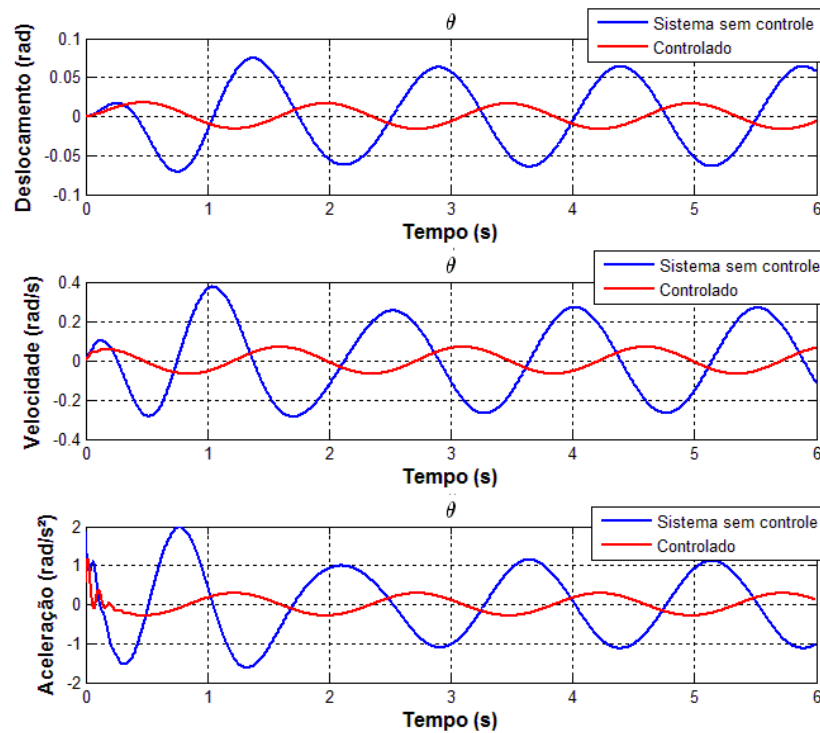


Figura 89 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

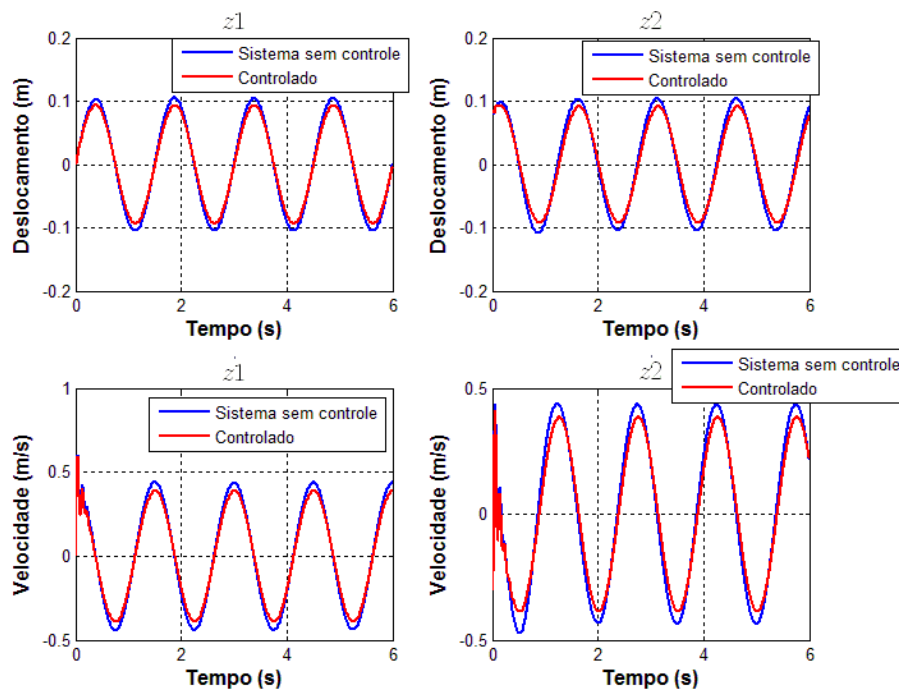


Figura 90 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

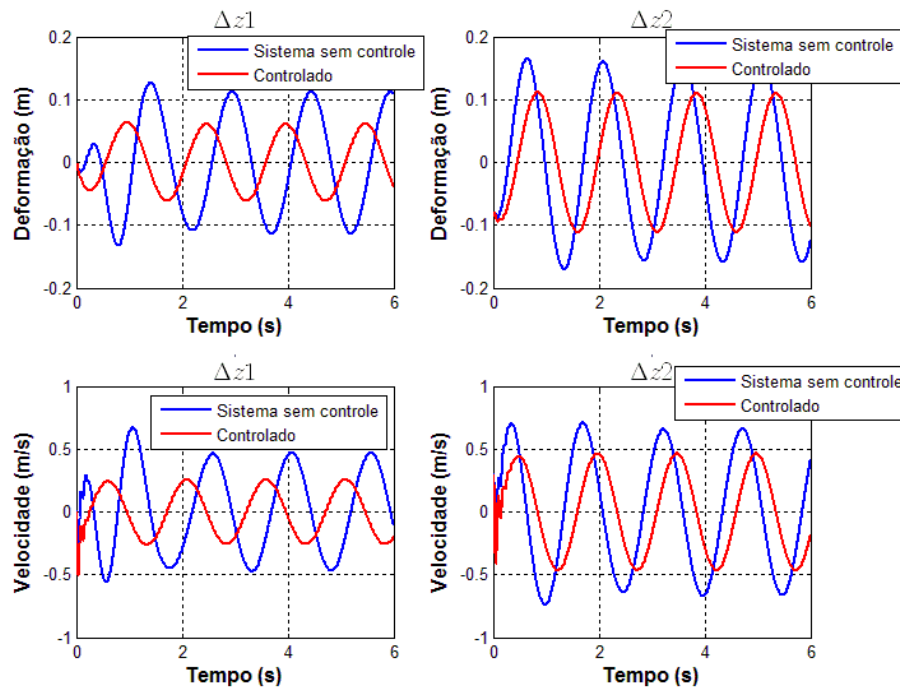


Figura 91 - Comparação das deflexões das molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal para o modelo de ½ carro

Os deslocamentos, velocidades e acelerações verticais reduziram bastante de intensidade. Percebe-se uma redução da ordem de 50% da original da amplitude na variação da aceleração, o que representa uma melhora significativa no conforto dos ocupantes. A mesma redução pode ser observada no deslocamento, velocidade e aceleração angular. O comportamento da massa não suspensa foi pouco alterado. O comportamento das molas foi alterado, reduzindo sua deformação e velocidade de deformação, o que contribui para sua durabilidade.

4.2.3 Estrada classe A

Prosseguindo com o procedimento aplicado ao modelo de ¼ de carro, foram feitas simulações com perfis de elevação de estrada de acordo com a norma ISO 8608. Inicialmente, simulou-se os dois modelos para uma estrada classe A. A Figura 92 traz o perfil utilizado como entrada nos sistemas. Os gráficos da Figura 93 à Figura 96 mostram os resultados das simulações.

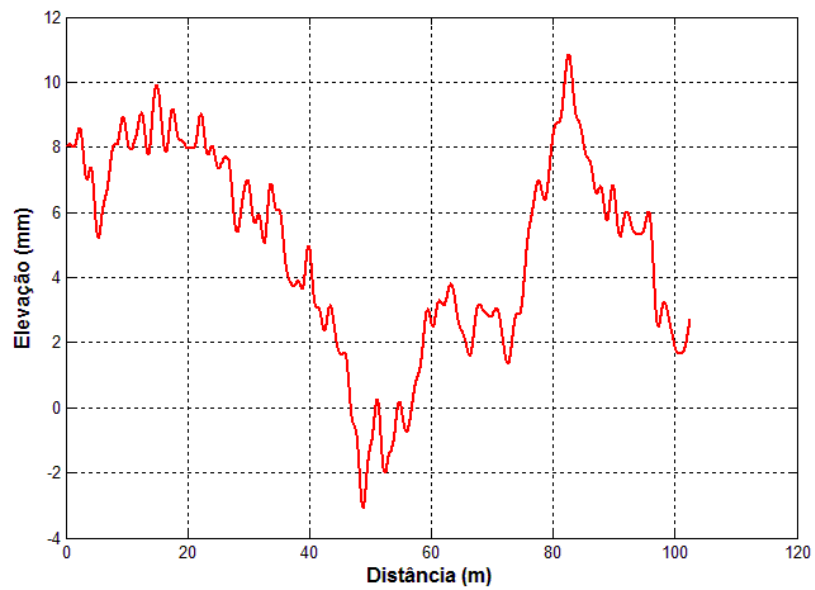


Figura 92 - Perfil de elevação da estrada classe A usada na simulação de ½ carro

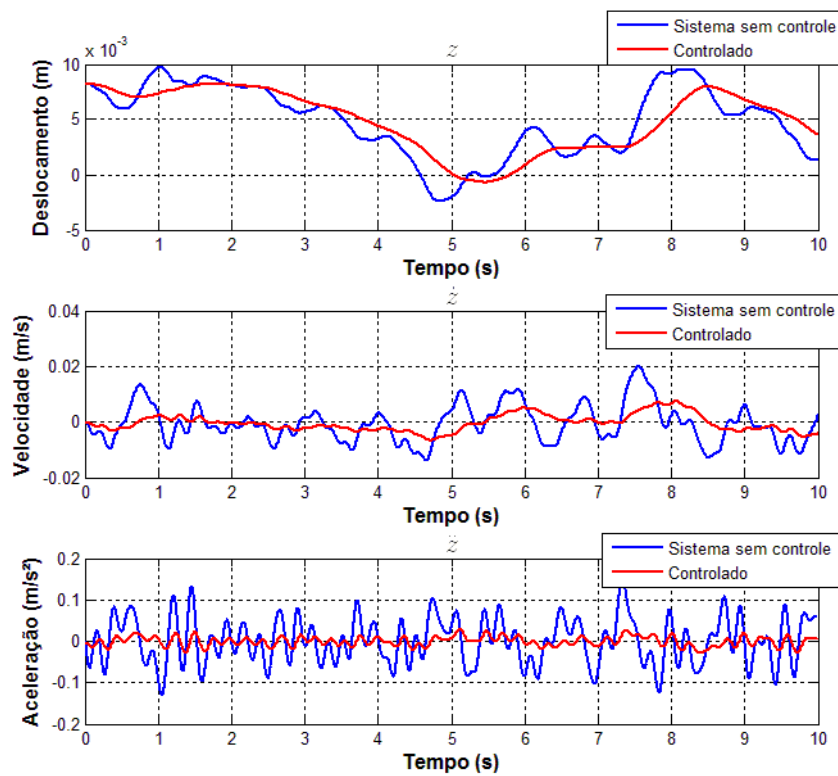


Figura 93 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de ½ carro

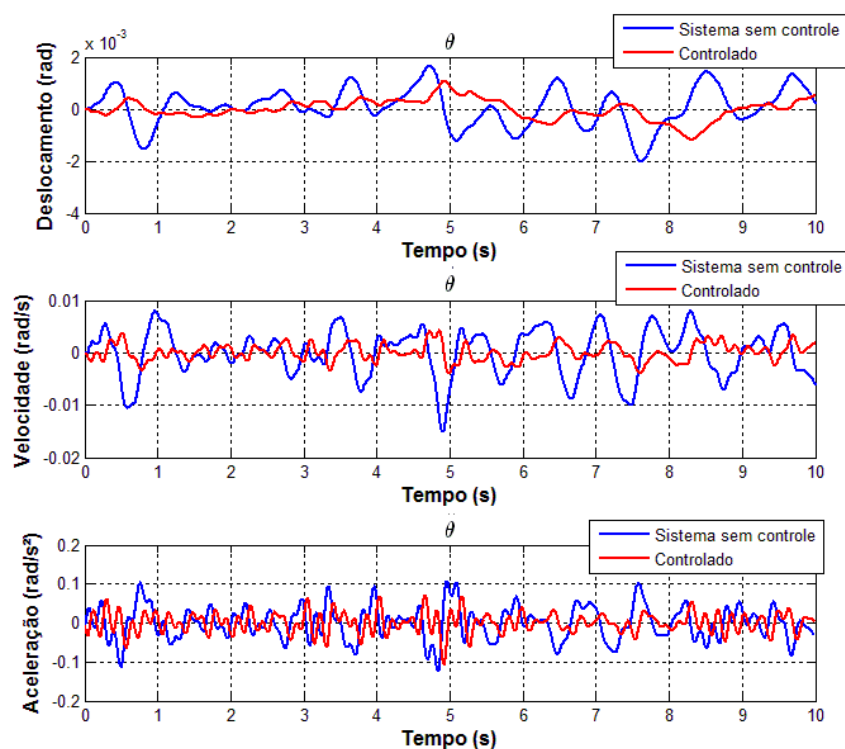


Figura 94 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

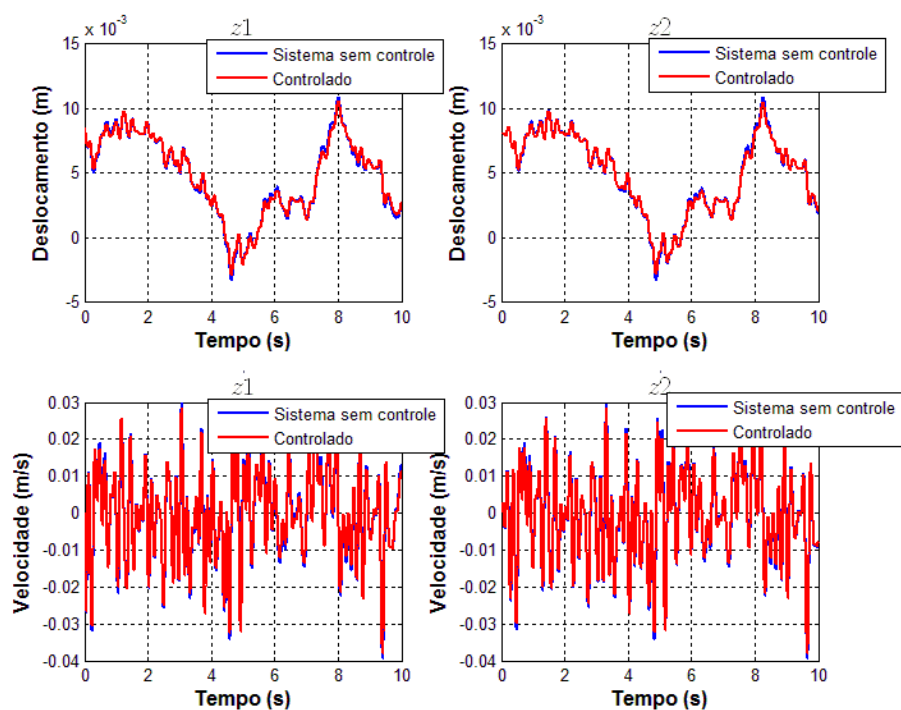


Figura 95 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

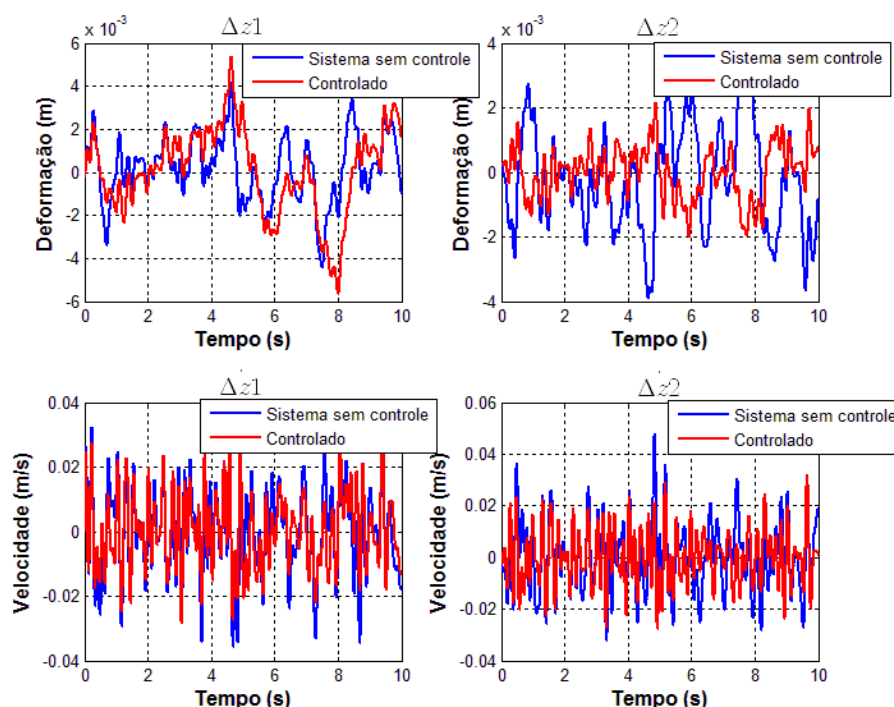


Figura 96 - Comparação das deflexões das molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de ½ carro

É possível notar que assim como nas outras simulações houve uma boa melhora no comportamento linear da massa suspensa. O perfil de elevação foi suavizado e as acelerações reduzidas. A melhora não foi tão expressiva para o comportamento angular. Houve redução da vibração, mas de menor intensidade que a redução na vibração linear. O comportamento da massa não suspensa praticamente não foi alterado. O comportamento da mola traseira apresentou alguma diferença, reduzindo a amplitude das deformações.

Foram aplicados os métodos descritos no item 2.3 da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe A para o modelo de ½ carro

	Modelo Original	Modelo Controlado
$a_w (m/s^2)$	0,0431	0,009226
MTVV (m/s^2)	0,06023	0,01327
VDV ($m/s^{1,75}$)	0,09767	0,02069

Como a estrada utilizada como base para a simulação está dentro da classe melhor avaliada, nota-se que as vibrações geradas não são desconfortáveis para nenhum dos modelos. No entanto, fica evidente a melhora do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu em aproximadamente 75% para todos os tipos de análise.

4.2.4 Estrada classe D

O mesmo procedimento foi repetido para uma estrada classe D. A Figura 97 mostra o perfil de elevação da estrada utilizada para a simulação. Os gráficos da Figura 98 à Figura 101 mostram os resultados das simulações.

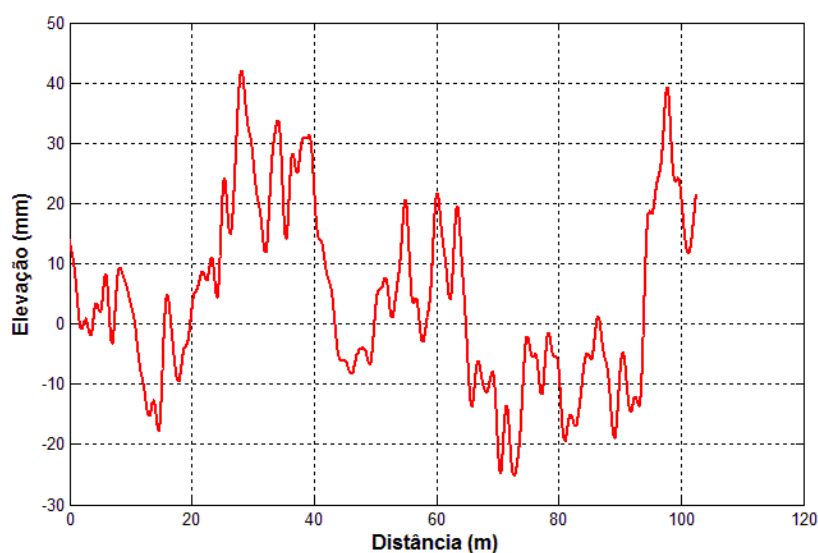


Figura 97 - Perfil de elevação da estrada classe D usada na simulação de ½ carro

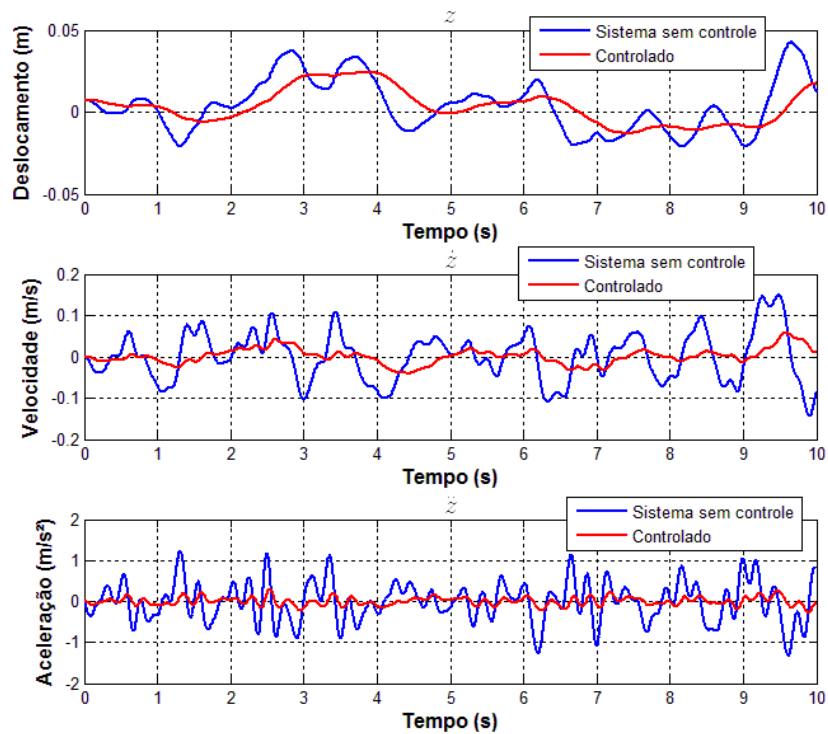


Figura 98 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de ½ carro

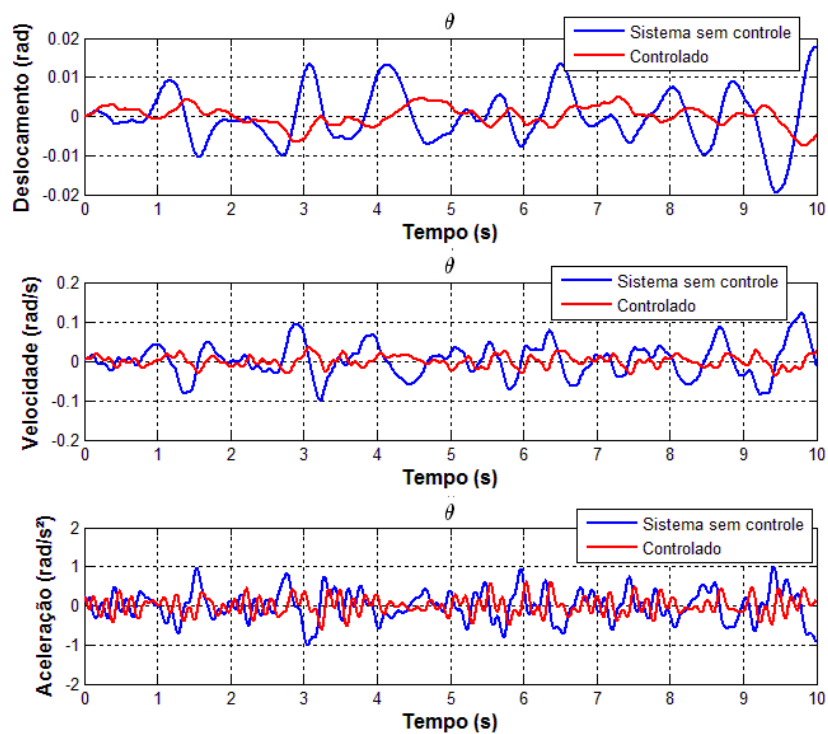


Figura 99 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de ½ carro

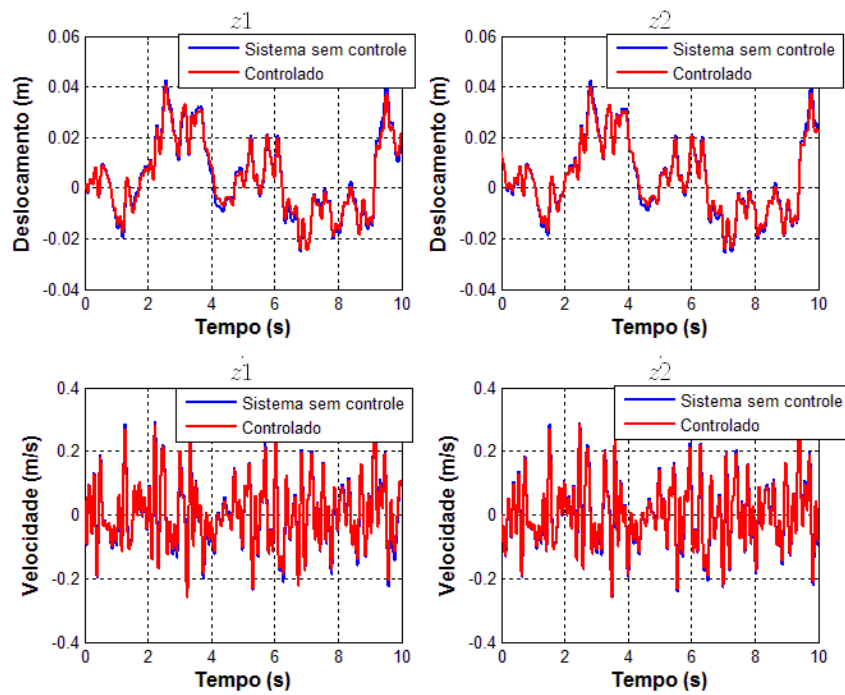


Figura 100 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

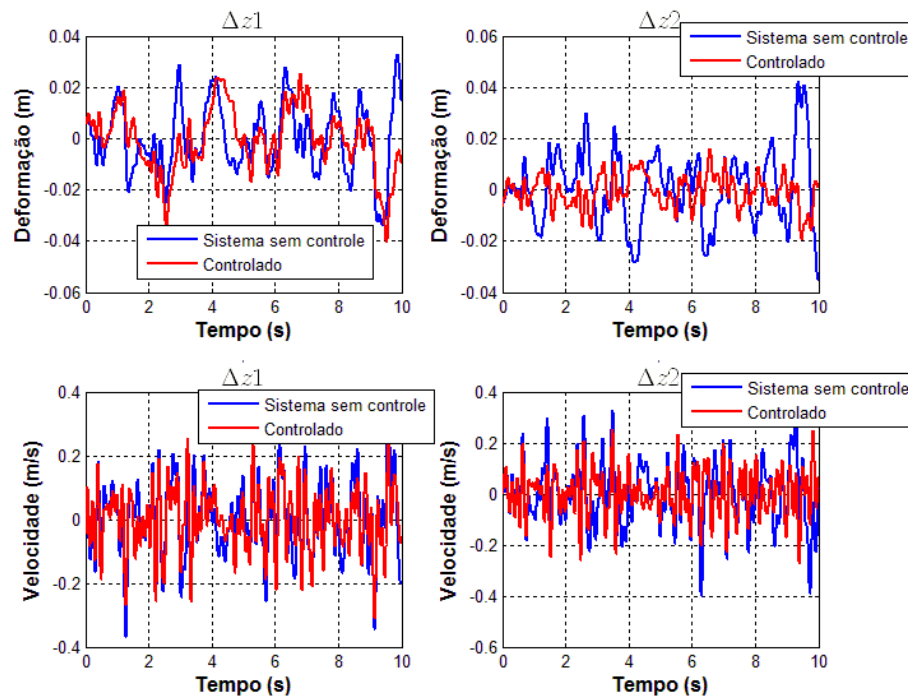


Figura 101 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

É possível notar que assim como nas outras simulações houve uma boa melhora no comportamento linear da massa suspensa. O perfil de elevação foi suavizado e as acelerações reduzidas. A melhora também foi menos expressiva para o comportamento angular. Houve redução da vibração, mas de menor intensidade que a redução na vibração linear. O comportamento da massa não suspensa praticamente não foi alterado. O comportamento da mola traseira apresentou alguma diferença, reduzindo a amplitude das deformações. As simulações apresentam o mesmo comportamento que para o caso da estrada classe A.

Foram aplicados os métodos descritos no item 2.3 da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe D para o modelo de ½ carro

	Modelo Original	Modelo Controlado
$a_w (m/s^2)$	0,3763	0,08049
MTVV (m/s^2)	0,5383	0,115
VDV ($m/s^{1,75}$)	0,9317	0,1929

Nesse caso, a estrada utilizada como base para a simulação gera valores que estão na faixa de levemente desconfortáveis para o modelo original. No caso do modelo controlado fica evidente a melhora do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu em aproximadamente 75% para todos os tipos de análise, se mantendo na faixa não desconfortável.

4.2.5 Estrada classe G

O mesmo procedimento foi repetido para uma estrada classe D. A Figura 102 mostra o perfil de elevação da estrada utilizada para a simulação. Os gráficos da Figura 103 à Figura 106 mostram os resultados das simulações.

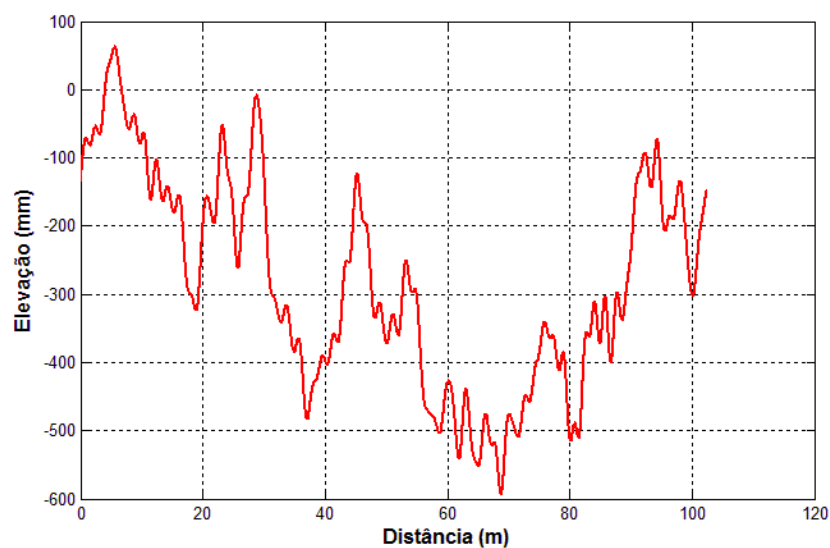


Figura 102 - Perfil de elevação da estrada classe G usada na simulação de $\frac{1}{2}$ carro

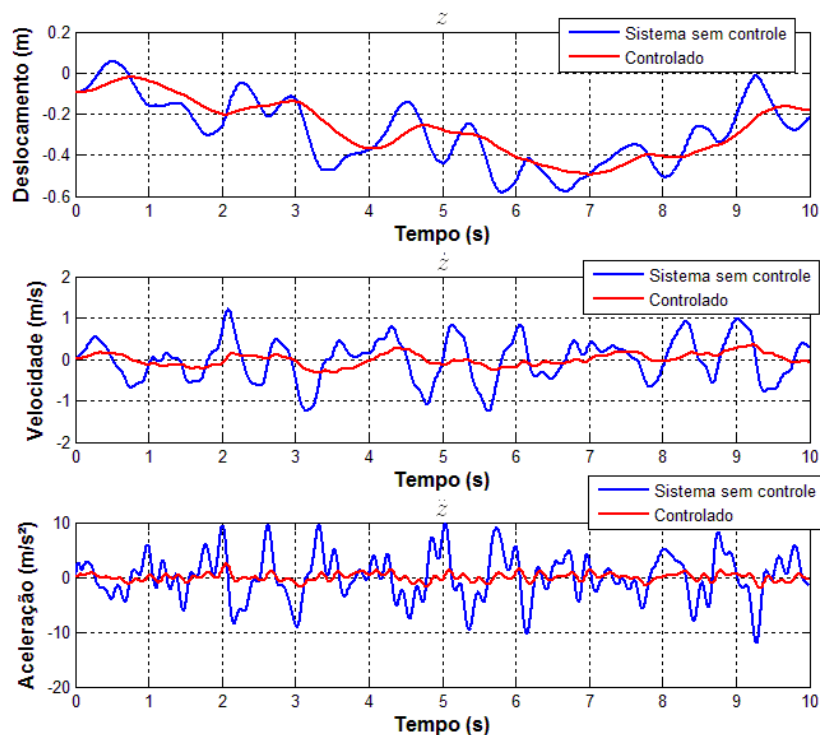


Figura 103 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

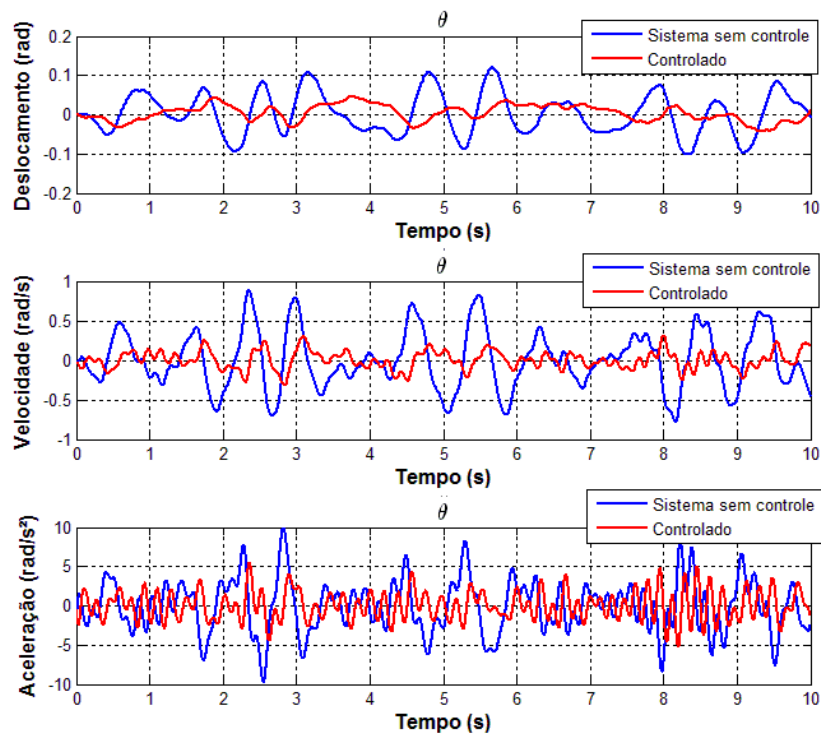


Figura 104 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

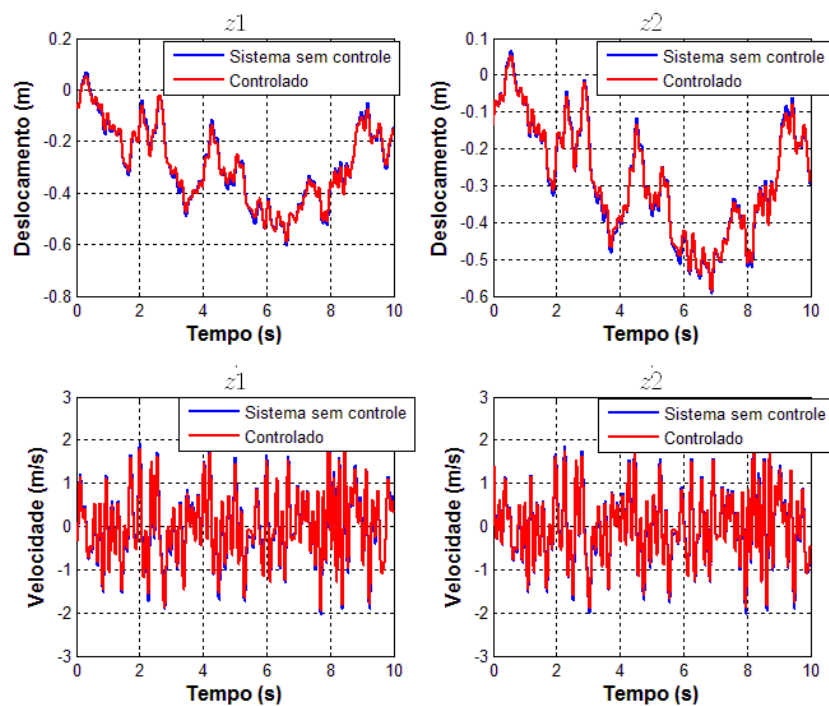


Figura 105 - Comparação do deslocamento e velocidade das massas não suspensas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de $\frac{1}{2}$ carro

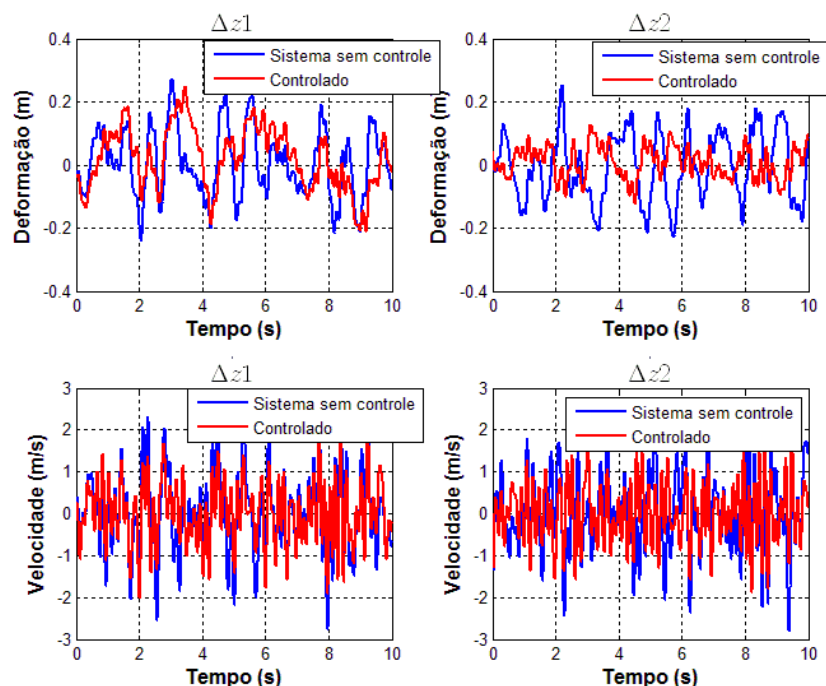


Figura 106 - Comparação das deflexões das molas e das velocidades de deflexão das molas entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de ½ carro

É possível notar que assim como nas outras simulações houve uma boa melhora no comportamento linear da massa suspensa. O perfil de elevação foi suavizado e as acelerações reduzidas. A melhora também foi menos expressiva para o comportamento angular. Houve redução da vibração, mas de menor intensidade que a redução na vibração linear. O comportamento da massa não suspensa praticamente não foi alterado. O comportamento da mola traseira apresentou alguma diferença, reduzindo a amplitude das deformações. As simulações apresentam o mesmo comportamento que para o caso da estrada classe A e D.

Foram aplicados os métodos descritos no item 2.3 da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe G para o modelo de ½ carro

	Modelo Original	Modelo Controlado
a_w (m/s ²)	2,798	0,5343
MTVV (m/s ²)	3,55	0,6616
VDV (m/s ^{1,75})	6,697	1,253

A estrada simulada nesse caso é extremamente acidentada e gera valores extremamente desconfortáveis para o modelo original. No caso do modelo controlado há uma melhora significativa do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu em aproximadamente 80% para todos os tipos de análise, mas ainda assim permanece na faixa um pouco desconfortável.

4.3 Modelo de carro completo

4.3.1 Entrada degrau

Também foi aplicado o mesmo procedimento para o modelo do carro completo. Foram elaboradas simulações da resposta dos sistemas original e controlado para uma entrada degrau de 0,1 metro. Os gráficos da Figura 107 à Figura 113 mostram os resultados do sistema controlado (em vermelho) e do sistema não controlado (em azul).

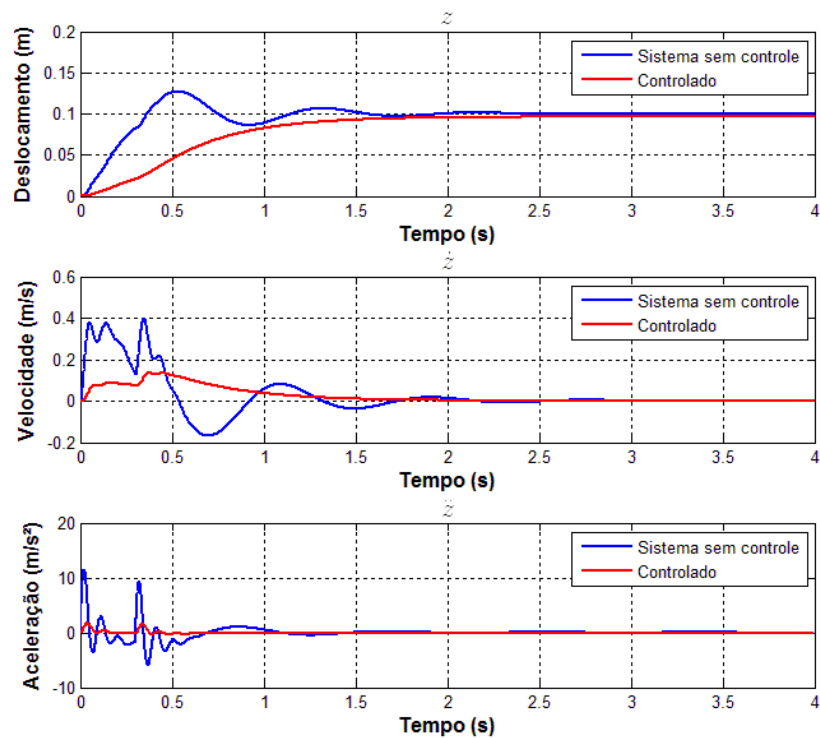


Figura 107 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

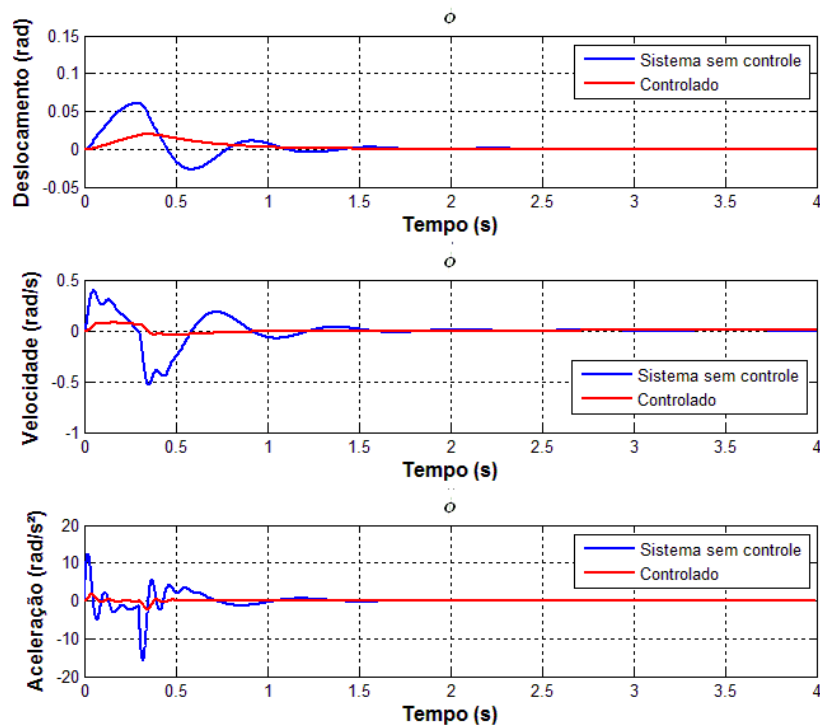


Figura 108 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

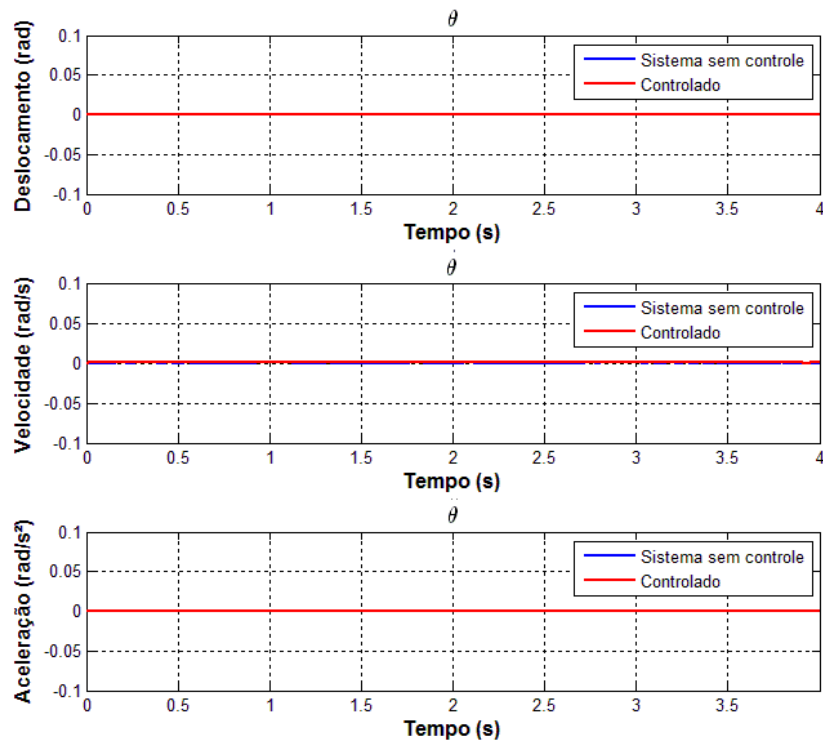


Figura 109 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

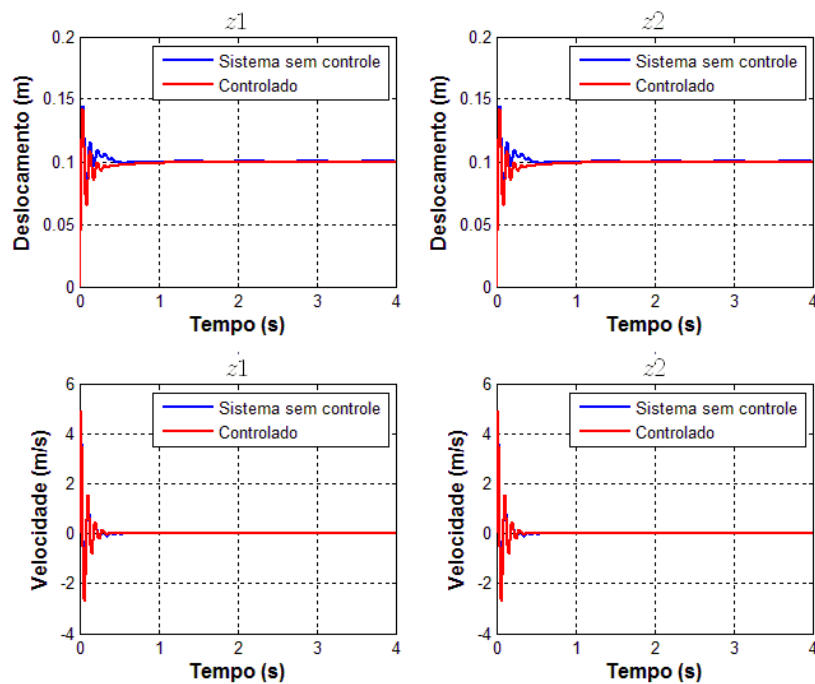


Figura 110 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

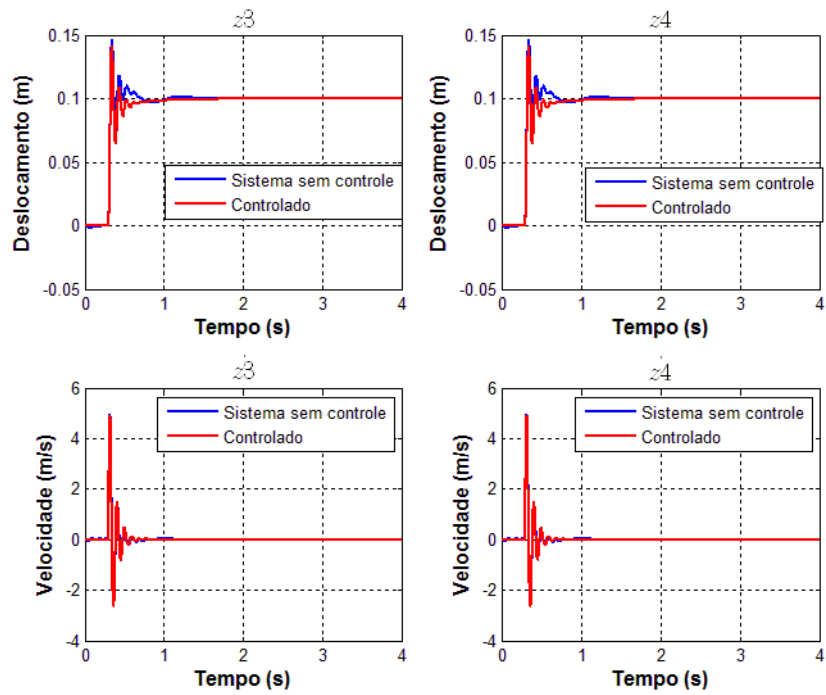


Figura 111 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

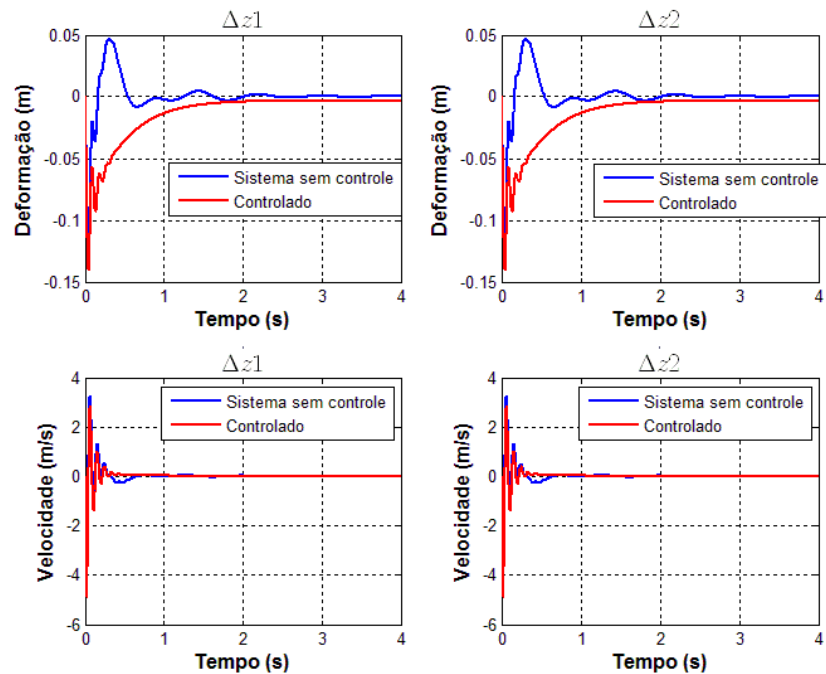


Figura 112 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo carro completo

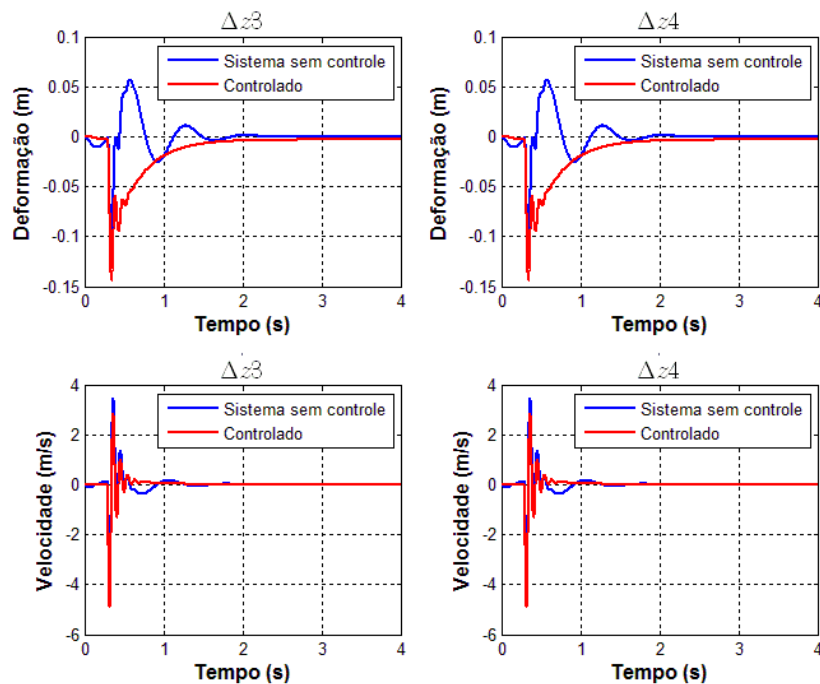


Figura 113 - Comparação das deflexões das molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo carro completo

Os deslocamentos, velocidades e acelerações verticais foram suavizados e reduziram de intensidade. Percebe-se uma redução da ordem de 80% da original no primeiro pico de aceleração, o que representa uma melhora significativa no conforto dos ocupantes. Para esse caso, percebe-se também uma grande melhora no comportamento de arfagem do sistema controlado, que apresentou uma grande redução nas acelerações. Como as duas rodas dianteiras e as duas rodas traseiras são excitadas ao mesmo tempo, não há rolagem. Isso é evidenciado pela Figura 109 e pelos gráficos das rodas. O comportamento das massas não suspensas foi pouco alterado. Já o comportamento das molas foi bastante modificado, devido à mudança de comportamento da carroceria.

Além das análises da carroceria e das rodas, foi utilizada metodologia explicada no item 3.1.3 e foram plotados gráficos de deslocamento, velocidade e acelerações a que o motorista é submetido, para a posição adotada. Os resultados podem ser vistos na Figura 114, Figura 115 e Figura 116

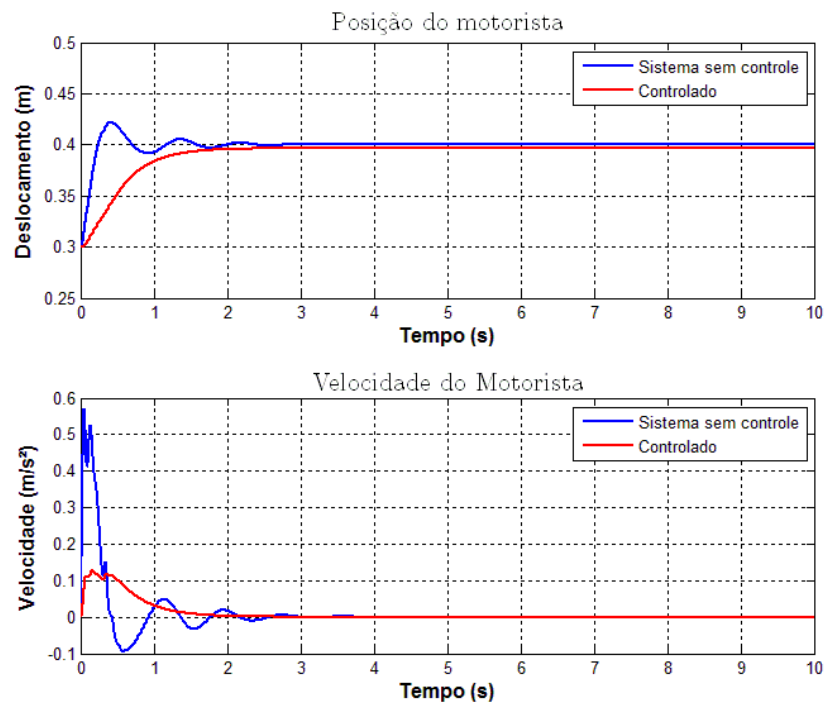


Figura 114 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

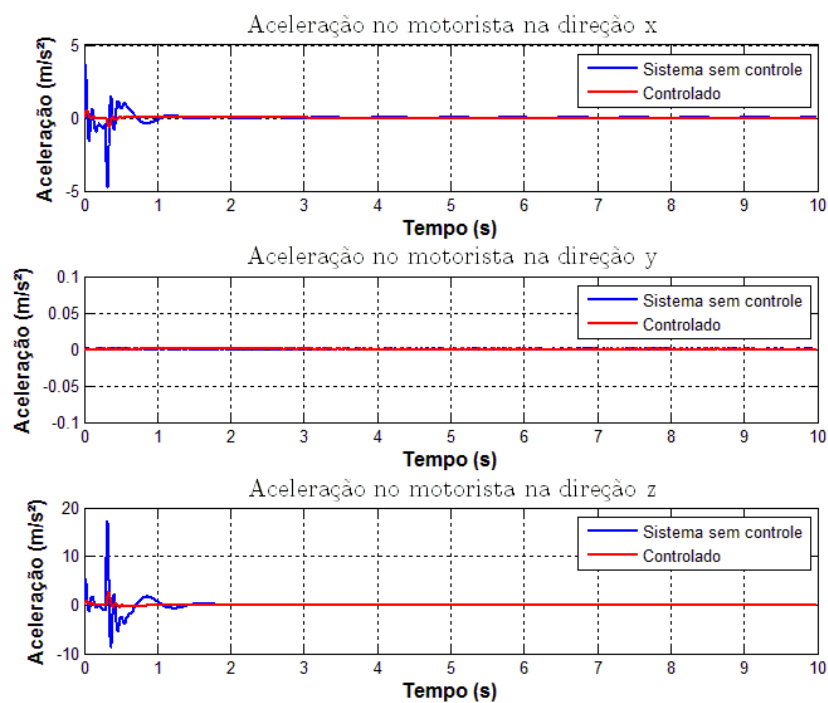


Figura 115 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

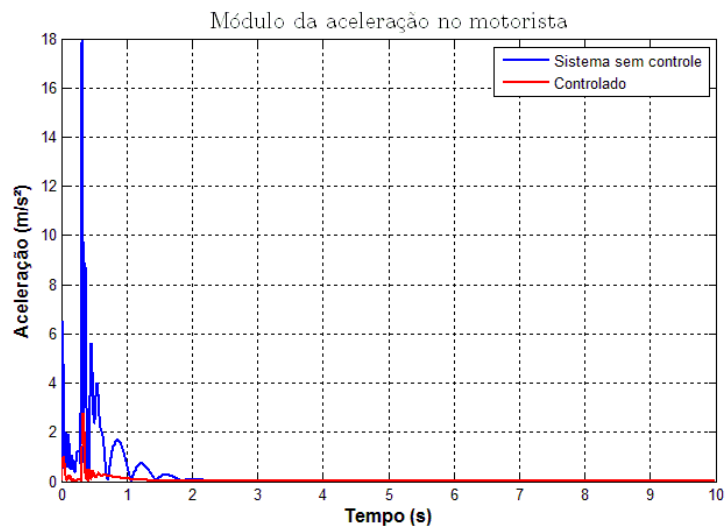


Figura 116 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma entrada degrau para o modelo de carro completo

É possível notar que, como era esperado, há uma grande redução nas acelerações a que o motorista é exposto. Uma vez que o comportamento dinâmico da carroceria demonstrou uma melhora, o conforto do motorista aumentou.

4.3.2 Entrada senoidal defasada

Assim como foi feito para o modelo original, foram feitas simulações para as mesmas entradas senoidais defasadas nas rodas da direita e da esquerda, a fim de avaliar a resposta do sistema controlado à rolagem. Os gráficos da Figura 117 à Figura 123 mostram os resultados do sistema controlado (em vermelho) e do sistema não controlado (em azul).

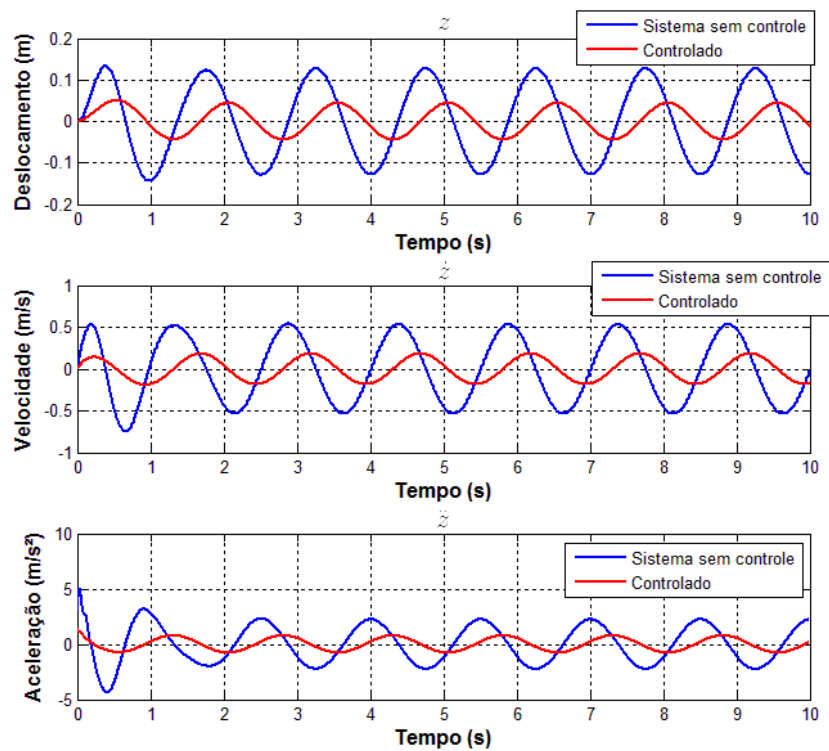


Figura 117 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

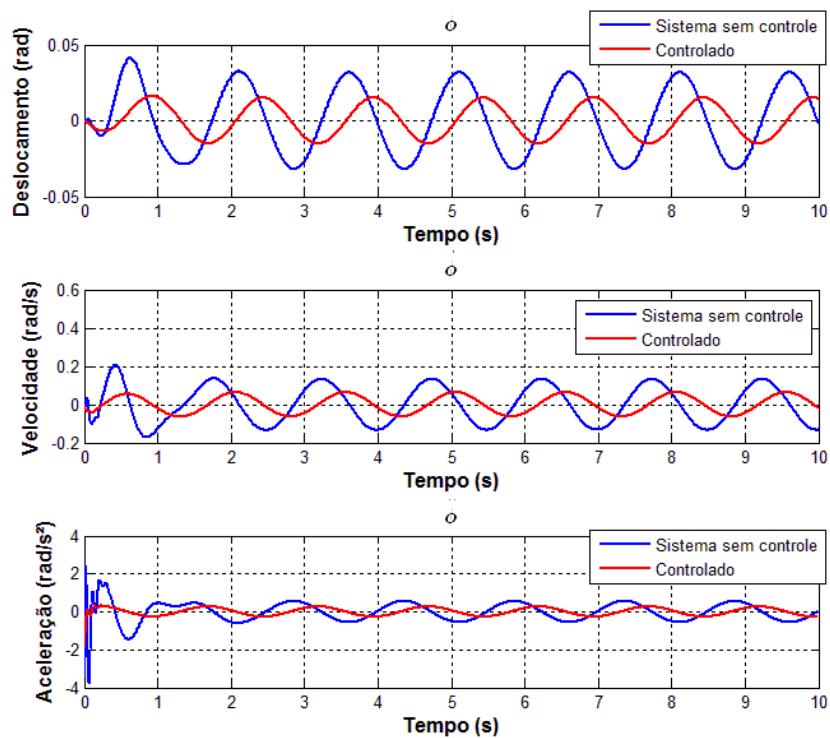


Figura 118 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

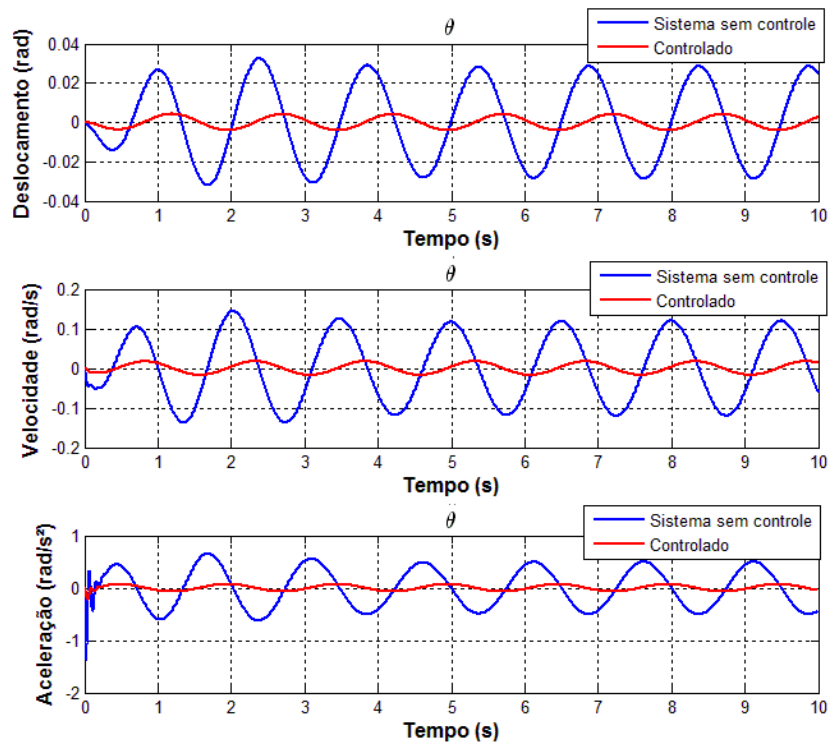


Figura 119 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

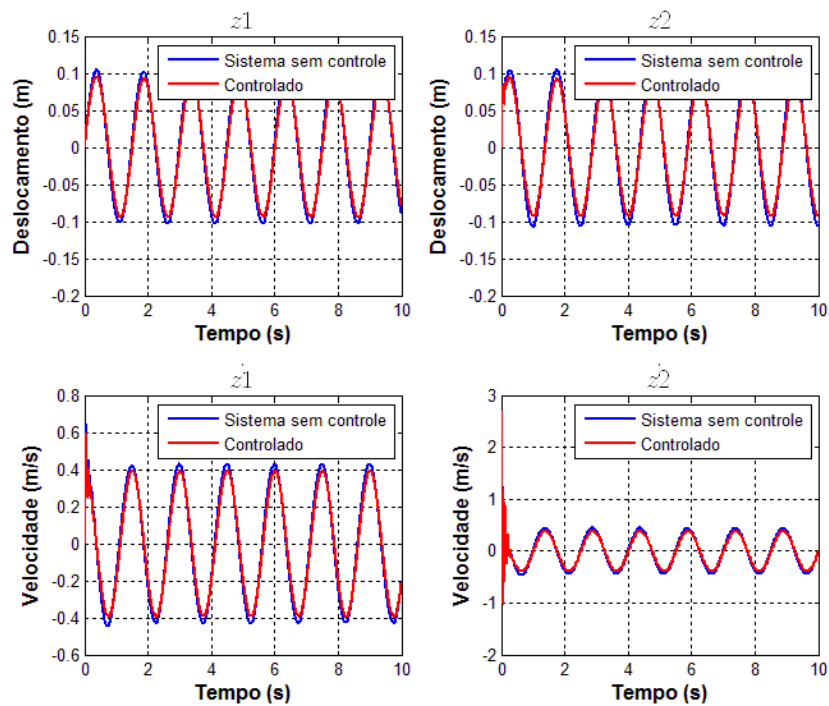


Figura 120 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

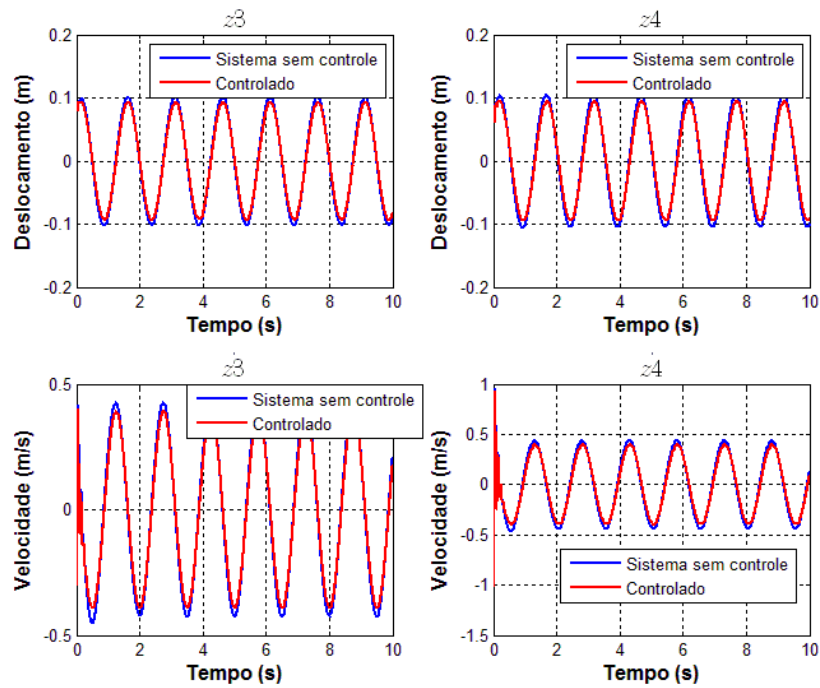


Figura 121 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

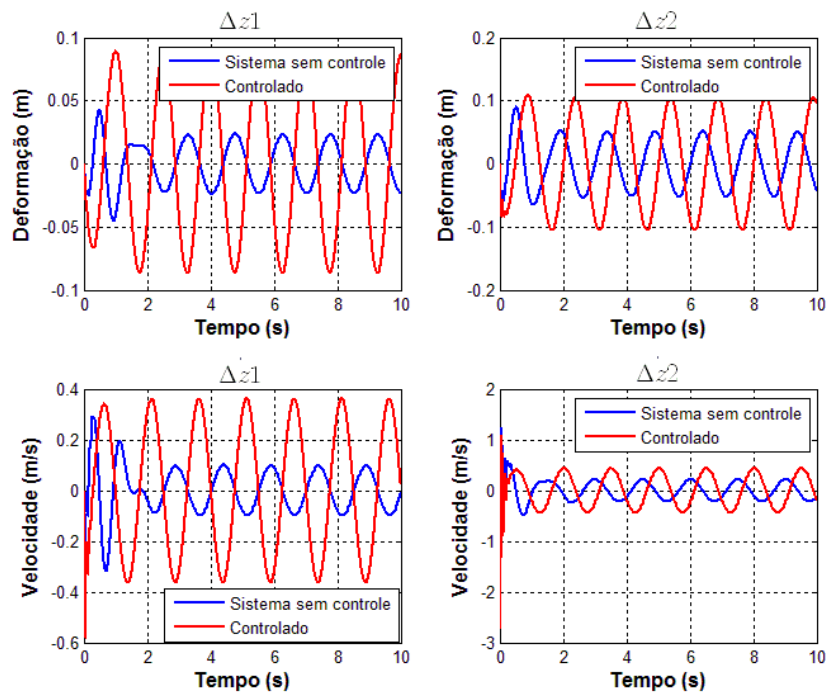


Figura 122 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo carro completo

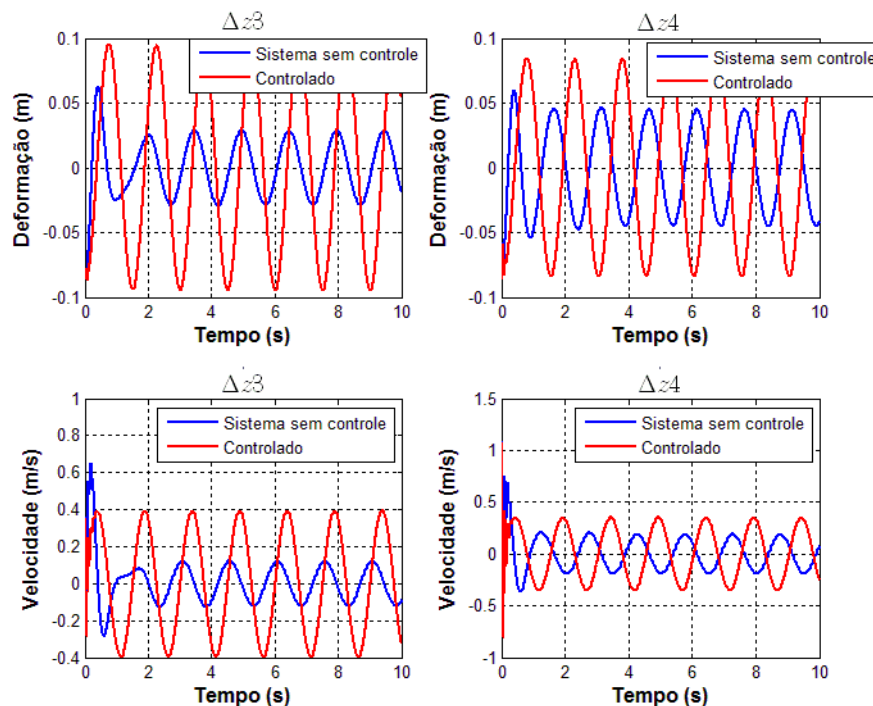


Figura 123 - Comparação das deflexões das molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo carro completo

Os deslocamentos, velocidades e acelerações verticais foram suavizados e reduziram de intensidade. Percebe-se uma redução da ordem de 50% da amplitude da aceleração, o que representa uma melhora significativa no conforto dos ocupantes. Percebe-se também uma pequena melhora no comportamento de arfagem do sistema controlado, que apresentou uma pequena redução nas acelerações. É possível notar uma grande melhora no comportamento de rolagem do sistema que reduziu muito a amplitude das acelerações. O comportamento das massas não suspensas praticamente não foi alterado. Já o comportamento das molas foi bastante modificado, aumentando bastante a amplitude da deformação da mola.

Além das análises da carroceria e das rodas, foi utilizada metodologia explicada no item 3.1.3 e foram plotados gráficos de deslocamento, velocidade e acelerações a que o motorista é submetido, para a posição adotada. Os resultados podem ser vistos na Figura 124, Figura 125 e Figura 126.

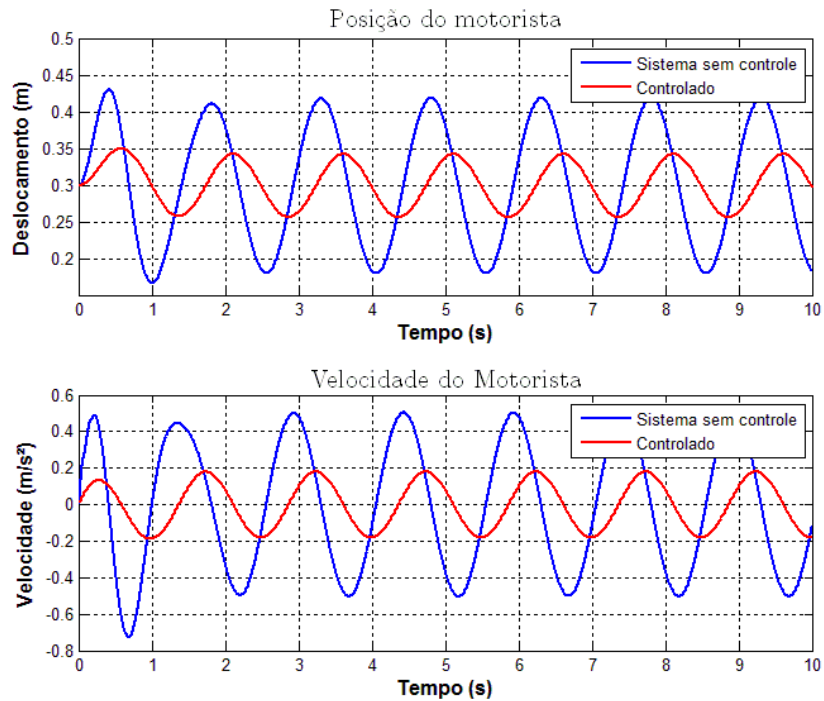


Figura 124 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

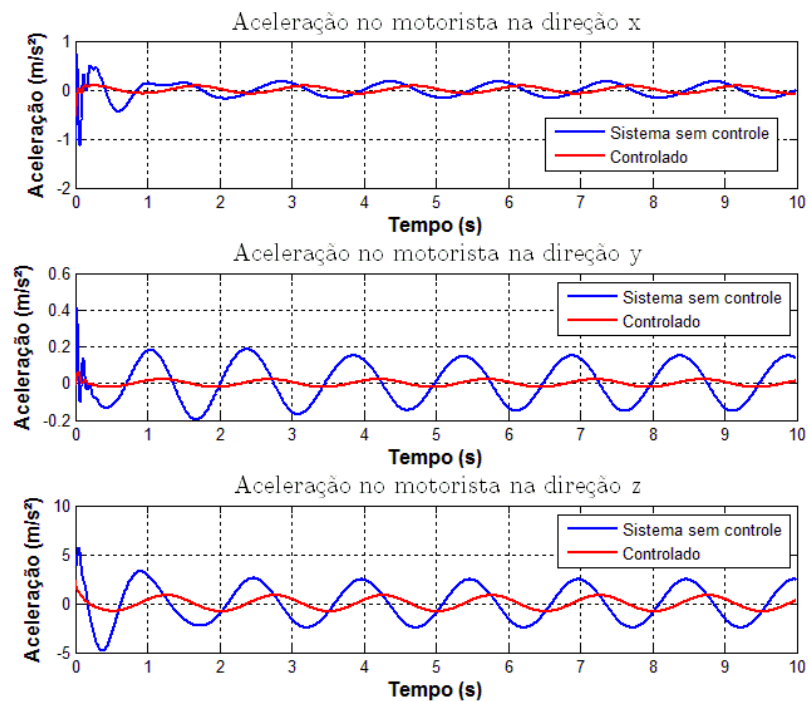


Figura 125 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

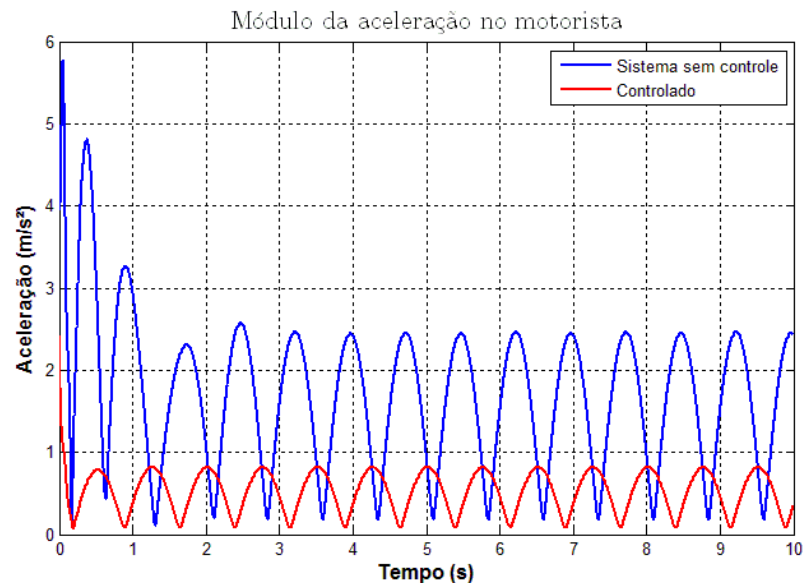


Figura 126 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma entrada senoidal defasada para o modelo de carro completo

É possível notar que, como era esperado, há uma grande redução nas acelerações a que o motorista é exposto. Uma vez que o comportamento dinâmico da carroceria demonstrou uma melhora, o conforto do motorista aumentou.

4.3.3 Estrada classe A

Prosseguindo com o procedimento aplicado aos modelo de $\frac{1}{4}$ de carro e de $\frac{1}{2}$ carro, foram feitas simulações com perfis de elevação de estrada de acordo com a norma ISO 8608. Inicialmente, simulou-se os dois modelos para uma estrada classe A. A Figura 127 traz o perfil utilizado como entrada nos sistemas. Os gráficos da Figura 128 à Figura 134 mostram os resultados das simulações.

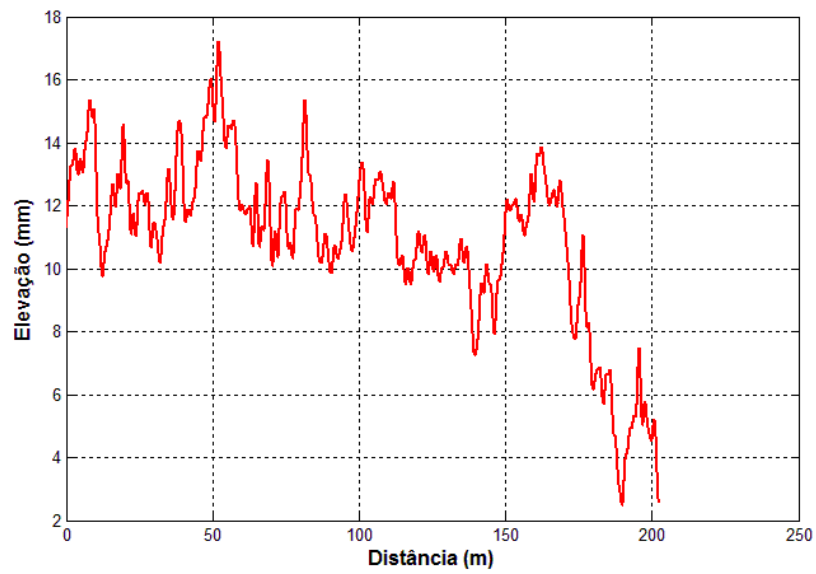


Figura 127 - Perfil de elevação da estrada classe A usada na simulação de carro completo

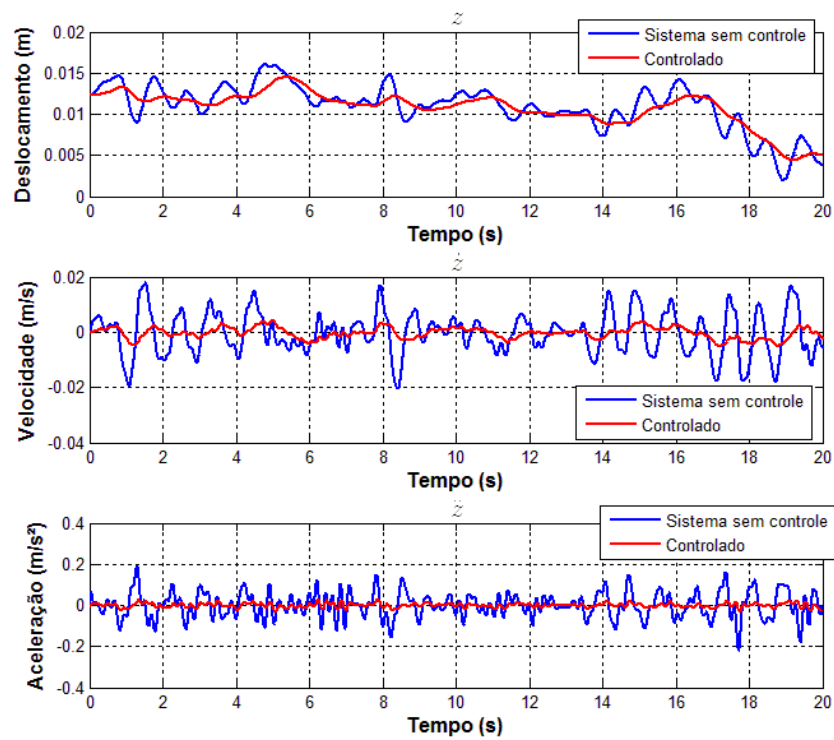


Figura 128 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo

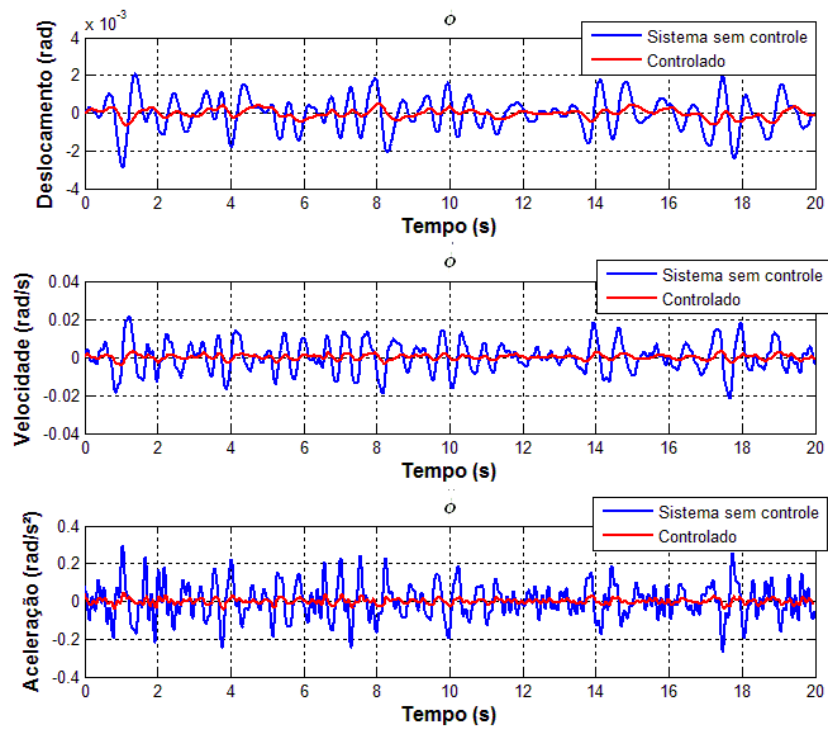


Figura 129 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo

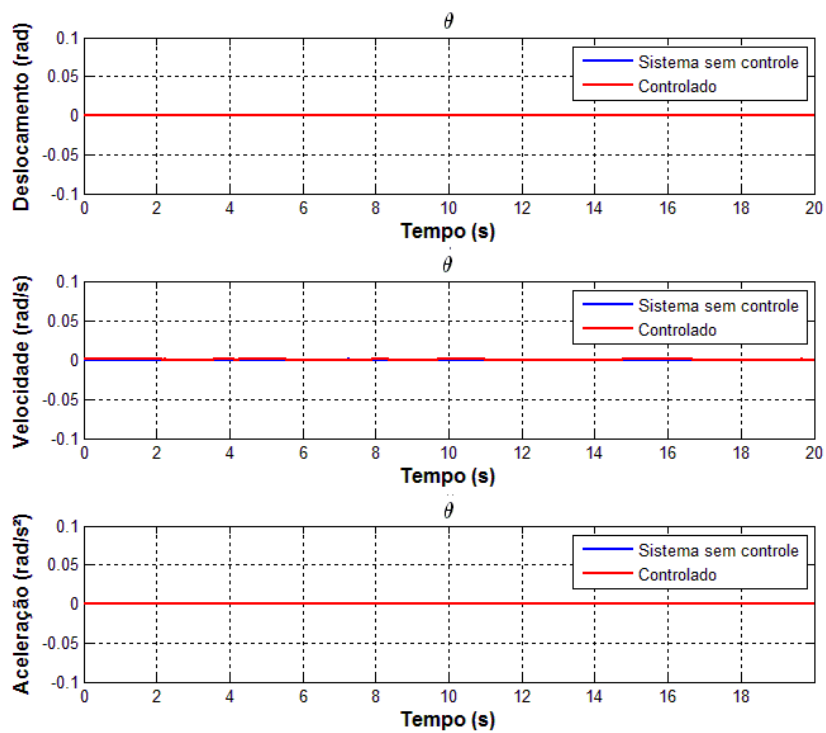


Figura 130 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo

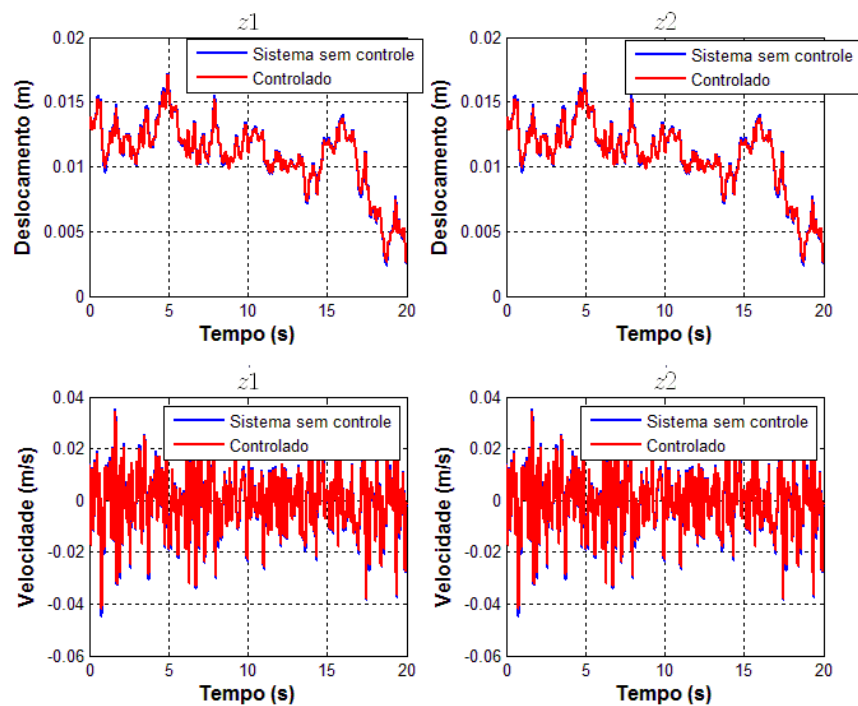


Figura 131 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo

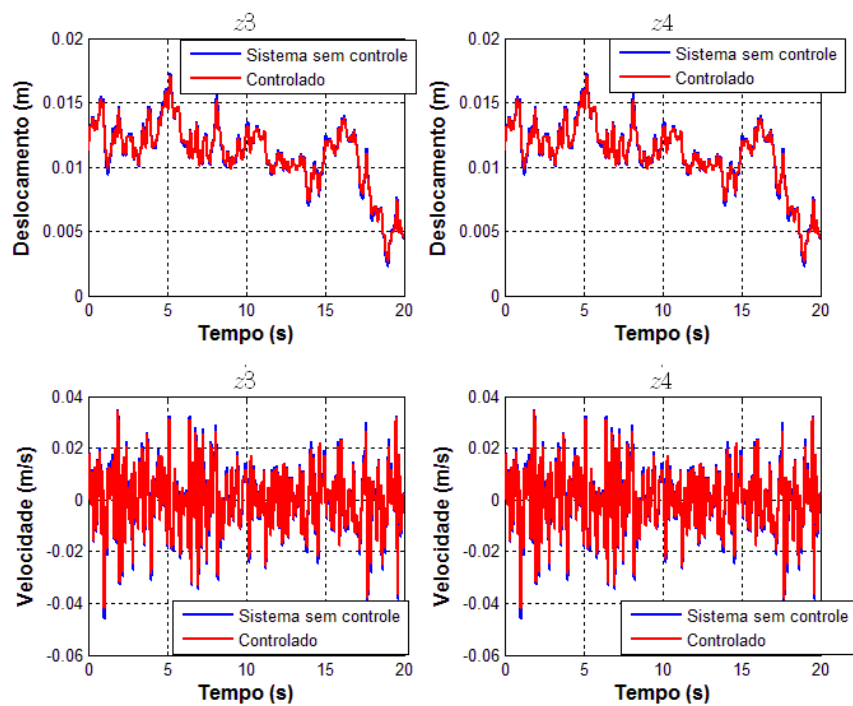


Figura 132 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo

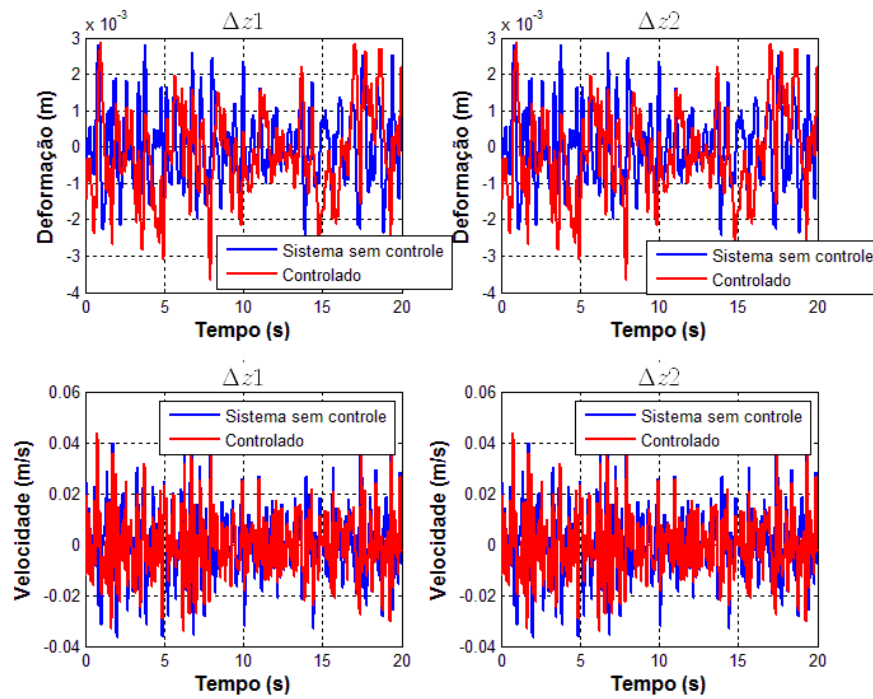


Figura 133 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo carro completo

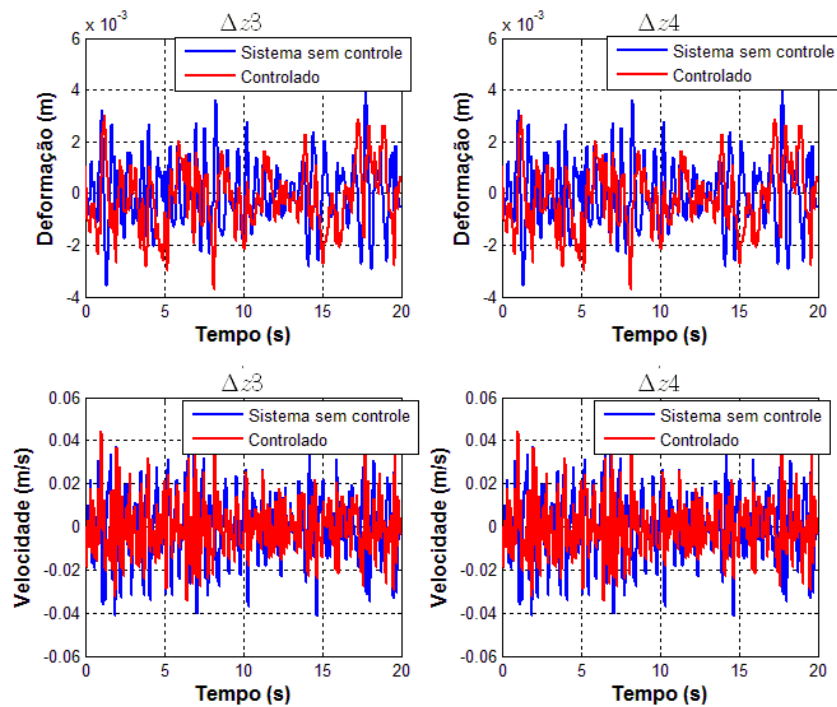


Figura 134 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo carro completo

Os deslocamentos, velocidades e acelerações verticais foram suavizados e reduziram de intensidade, o que representa uma melhora significativa no conforto dos ocupantes. Percebe-se também uma grande melhora no comportamento de arfagem do sistema controlado, que apresentou uma grande redução nas acelerações. Como as duas rodas dianteiras e as duas rodas traseiras são excitadas ao mesmo tempo, não há rolagem. O comportamento das massas não suspensas praticamente não foi alterado. Já o comportamento das molas foi bastante modificado, devido à mudança de comportamento da carroceria.

Além das análises da carroceria e das rodas, foi utilizada metodologia explicada no item 3.1.3 e foram plotados gráficos de deslocamento, velocidade e acelerações a que o motorista é submetido, para a posição adotada. Os resultados podem ser vistos na Figura 135, Figura 136 e Figura 137.

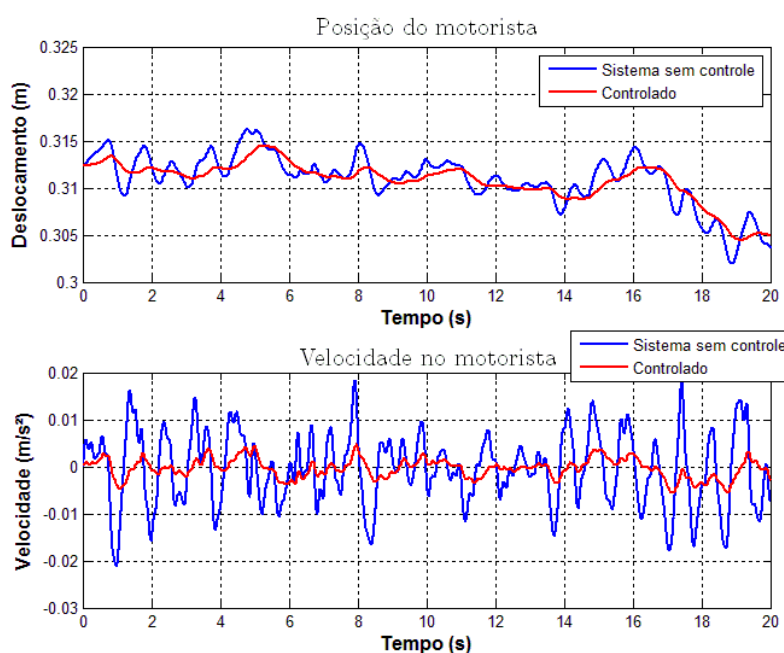


Figura 135 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo

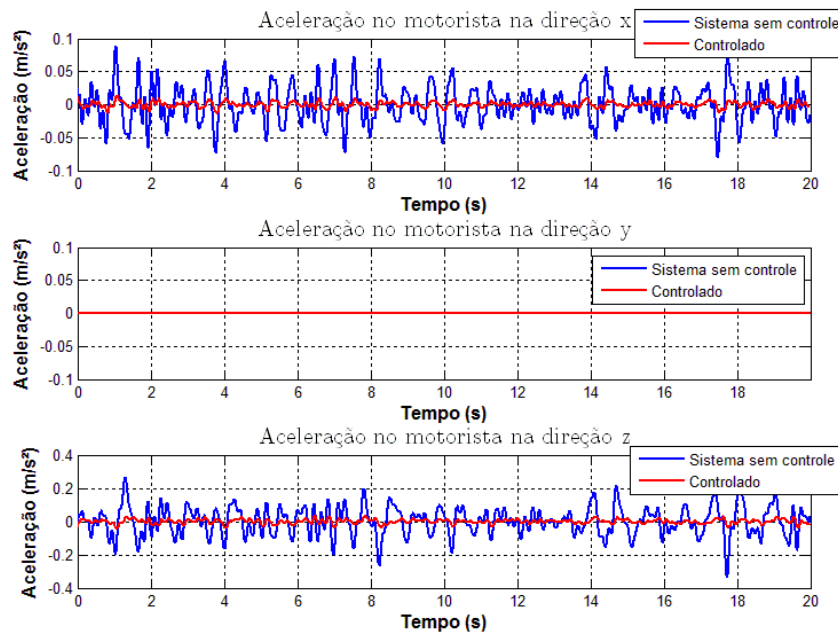


Figura 136 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo

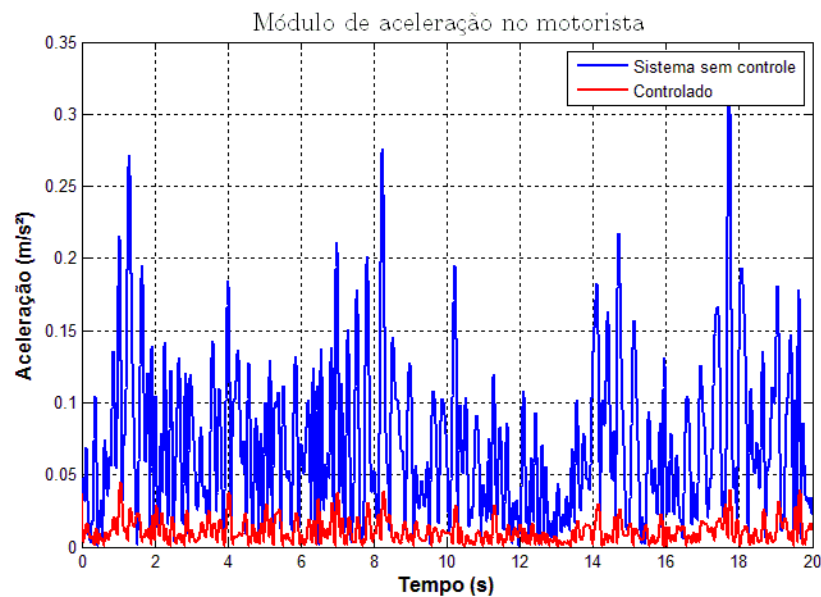


Figura 137 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe A para o modelo de carro completo

Assim como ocorreu uma grande redução nas acelerações a que a carroceria era submetida, houve uma grande redução nas acelerações no motorista. A partir dos valores da aceleração no motorista, foram aplicados os métodos descritos no item 2.3

da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Foram avaliadas as acelerações nas direções x e z. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 17 e na Tabela 18.

Tabela 17 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe A para vibração vertical para o modelo de carro completo

	Modelo Original	Modelo Controlado
$a_w (m/s^2)$	0,0574	0,009946
MTVV (m/s^2)	0,07785	0,01462
VDV ($m/s^{1,75}$)	0,1662	0,02889

Tabela 18 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe A para vibração horizontal para o modelo de carro completo

	Modelo Original	Modelo Controlado
$a_w (m/s^2)$	0,02373	0,003489
MTVV (m/s^2)	0,03452	0,005286
VDV ($m/s^{1,75}$)	0,06553	0,009614

Como a estrada utilizada como base para a simulação está dentro da classe melhor avaliada, nota-se que as vibrações geradas não são desconfortáveis para nenhum dos modelos. No entanto, fica evidente a melhora do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu em aproximadamente 80% para todos os tipos de análise. Fica claro também que as vibrações verticais são de maior magnitude e mais influentes para o conforto nesse caso.

Outra avaliação de conforto feita foi avaliar a intensidade da vibração para cada frequência. Foi plotado gráfico da Figura 138, que mostra a intensidade da aceleração em cada terço de oitava. Os valores obtidos foram comparados com os limites de exposição informados na norma ISO 2631. Nesse caso, como a estrada avaliada é classe A os limites na norma não ficam visíveis, ou seja, tanto o sistema controlado quanto o sem controle suportariam uma exposição maior que 24 horas a esse sinal.

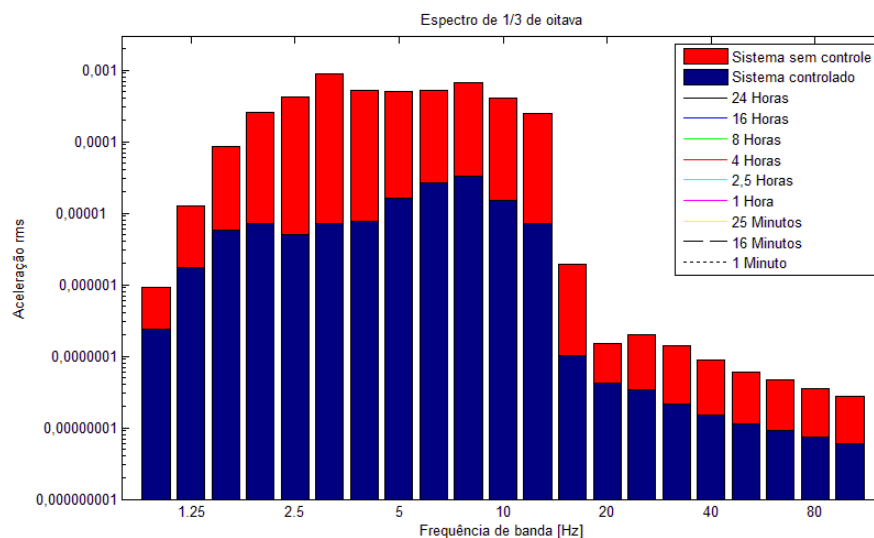


Figura 138 - Comparação da aceleração vertical do motorista em função da frequência para uma estrada perfil A

Nota-se que a aceleração para frequências superiores as 20 Hz é bastante atenuada. Além disso, como a pista é da melhor categoria, os limites de conforto não aparecem no gráfico, uma vez que os valores obtidos são muito mais baixos.

4.3.4 Estrada classe D

O mesmo procedimento foi repetido para uma estrada classe D. A Figura 139 mostra o perfil de elevação da estrada utilizada para a simulação. Os gráficos da Figura 140 à Figura 146 mostram os resultados das simulações.

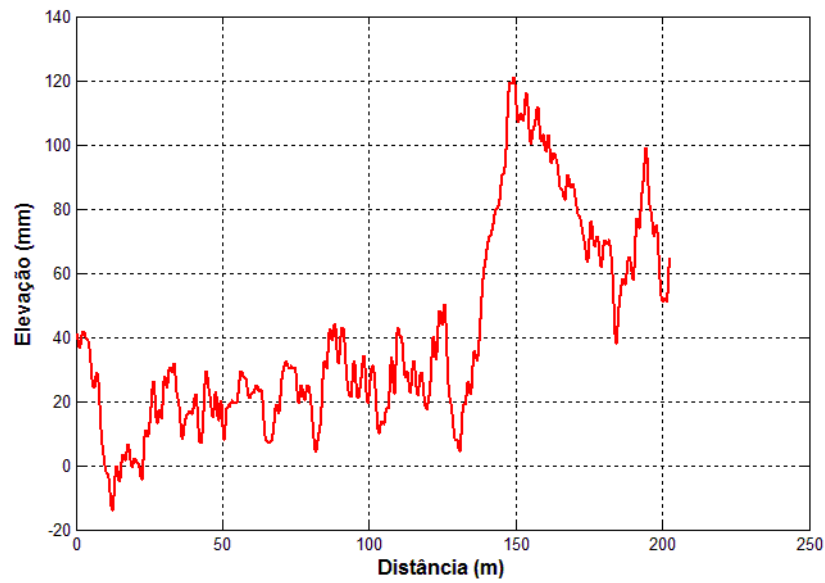


Figura 139 - Perfil de elevação da estrada classe D usada na simulação de carro completo

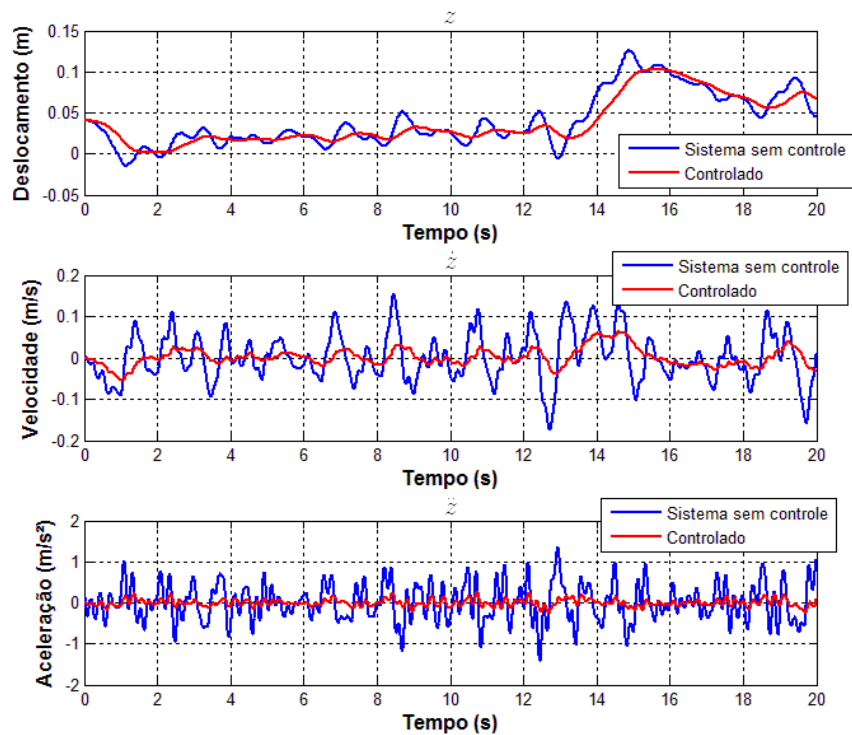


Figura 140 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo

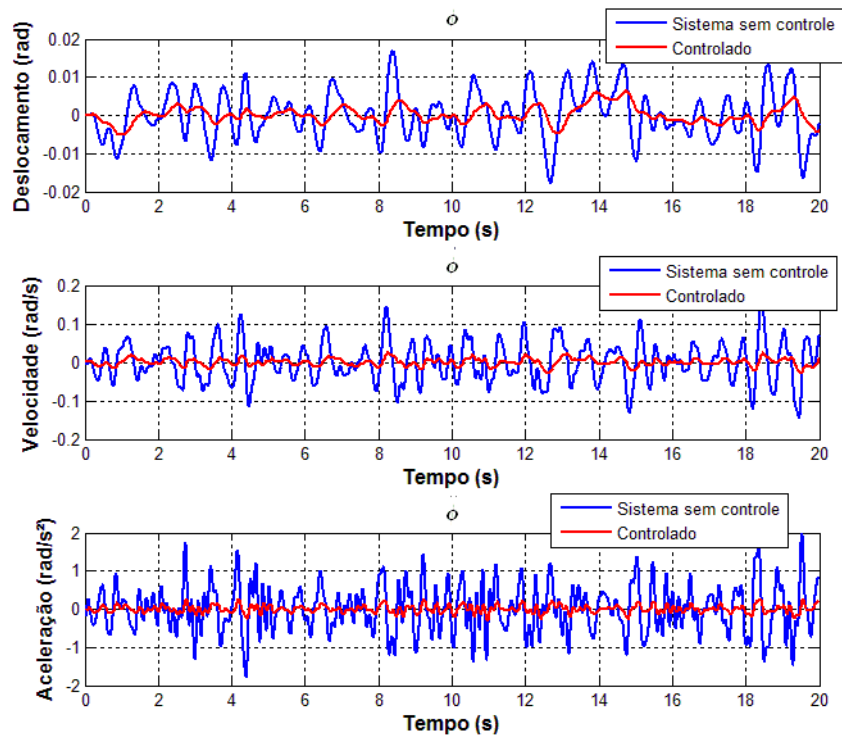


Figura 141 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo

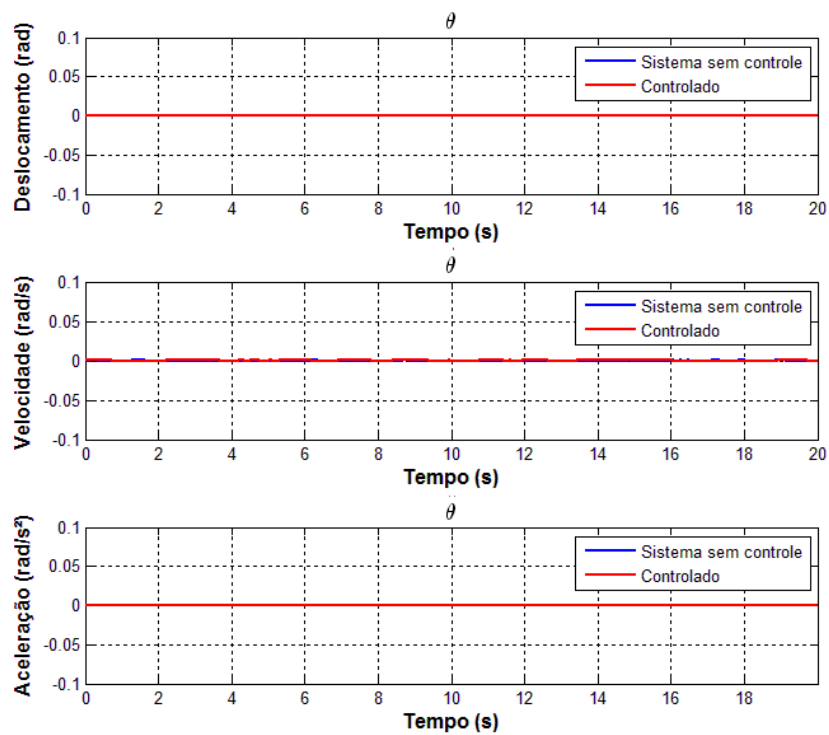


Figura 142 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo

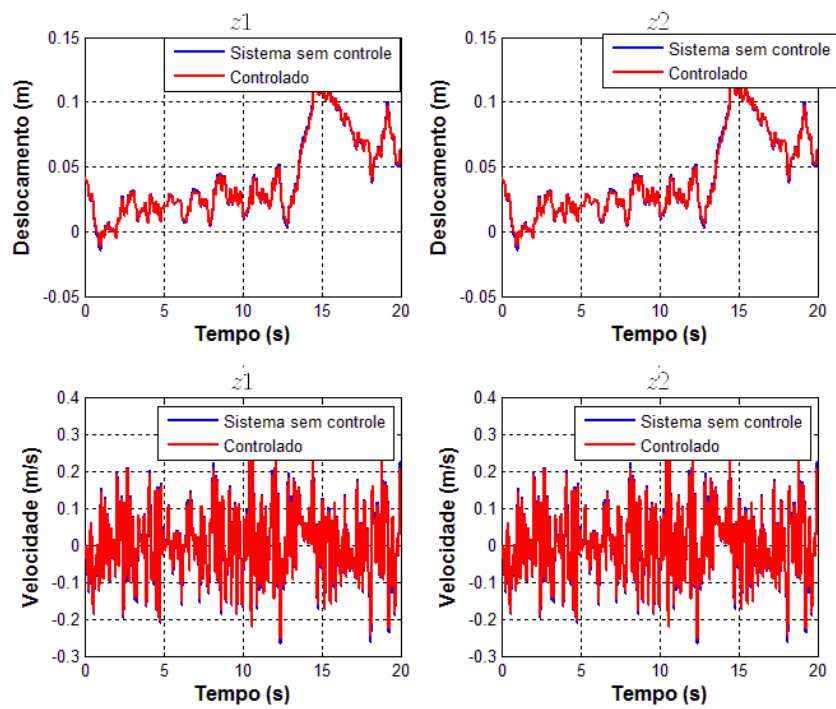


Figura 143 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo

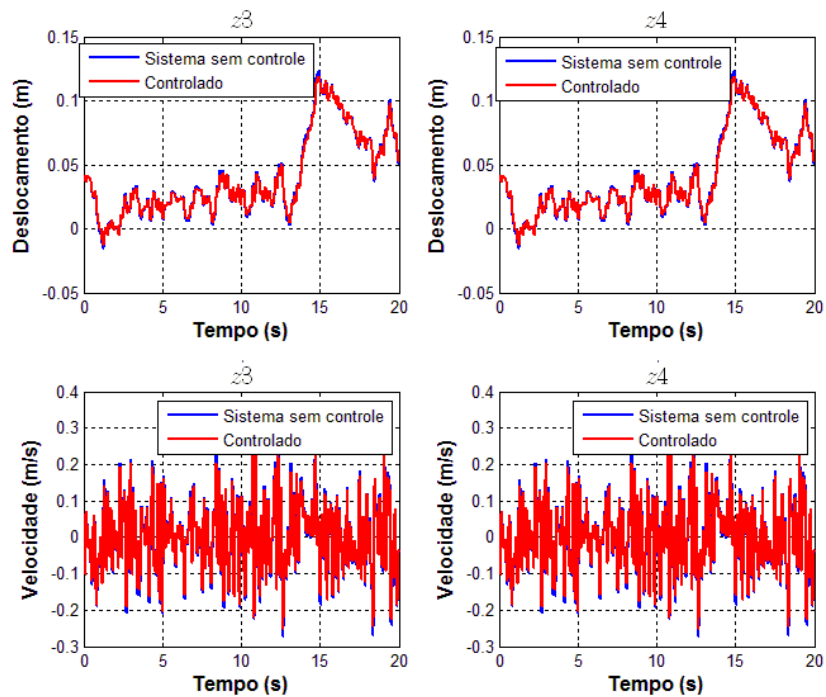


Figura 144 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo

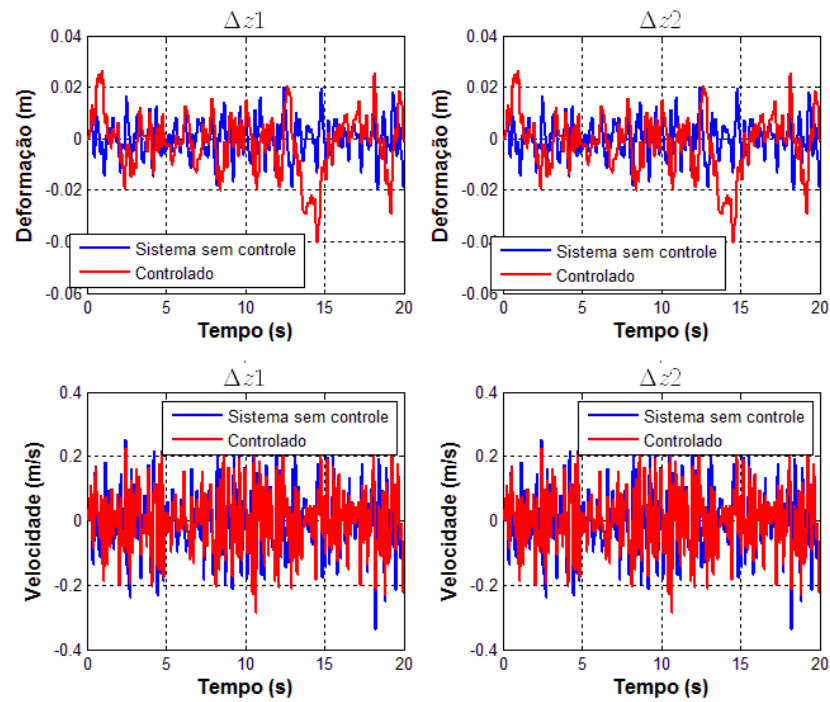


Figura 145 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo carro completo

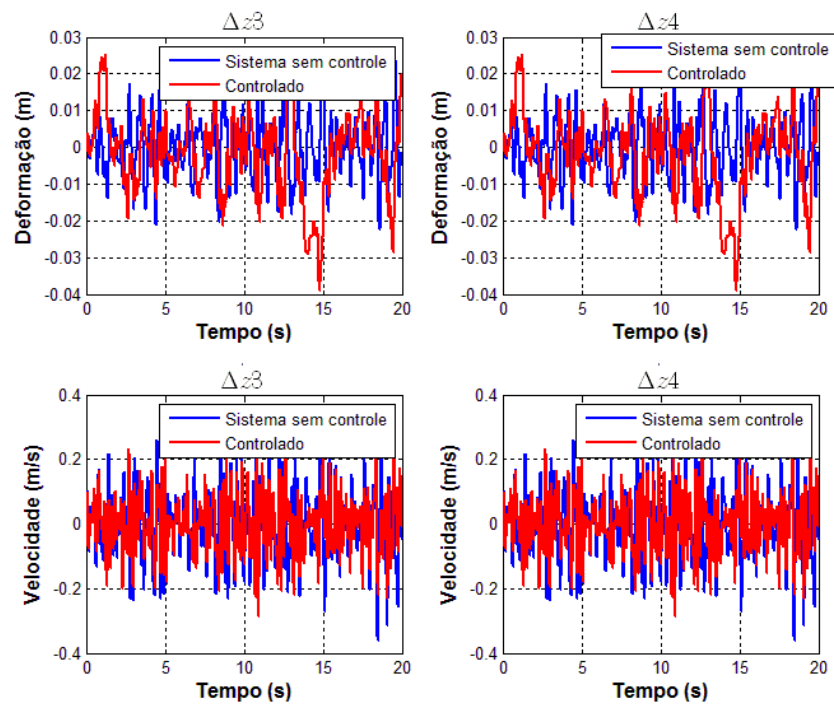


Figura 146 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo carro completo

Os deslocamentos, velocidades e acelerações verticais foram suavizados e reduziram de intensidade, o que representa uma melhora significativa no conforto dos ocupantes. Percebe-se também uma grande melhora no comportamento de arfagem do sistema controlado, que apresentou uma grande redução nas acelerações. Como as duas rodas dianteiras e as duas rodas traseiras são excitadas ao mesmo tempo, não há rolagem. O comportamento das massas não suspensas praticamente não foi alterado. Já o comportamento das molas foi bastante modificado, devido à mudança de comportamento da carroceria. O comportamento foi semelhante ao caso da estrada classe A.

Além das análises da carroceria e das rodas, foi utilizada metodologia explicada no item 3.1.3 e foram plotados gráficos de deslocamento, velocidade e acelerações a que o motorista é submetido, para a posição adotada. Os resultados podem ser vistos na Figura 147, Figura 148 e Figura 149.

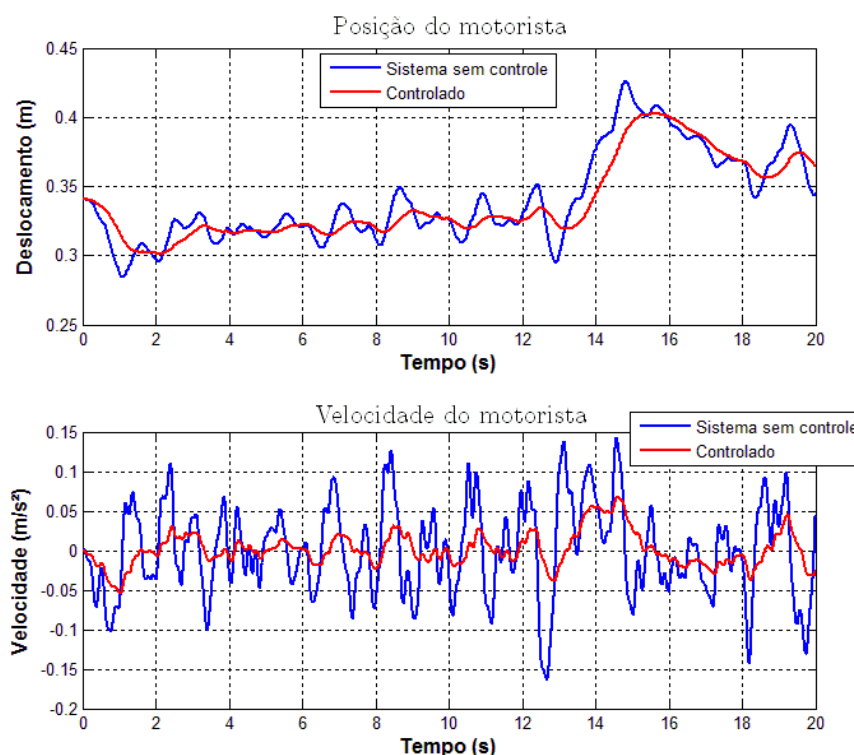


Figura 147 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo

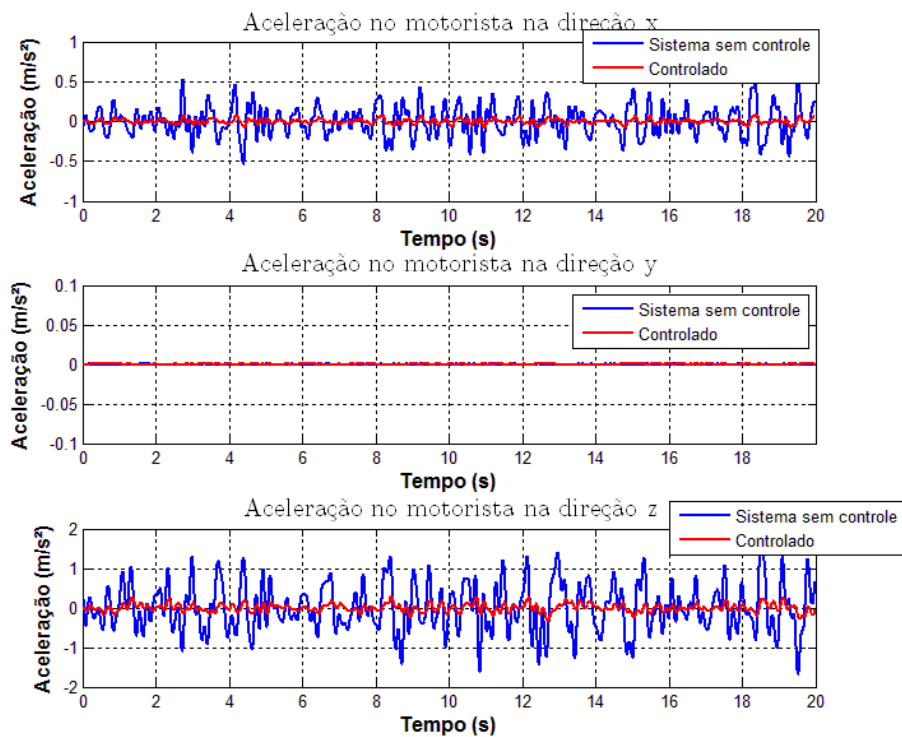


Figura 148 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo

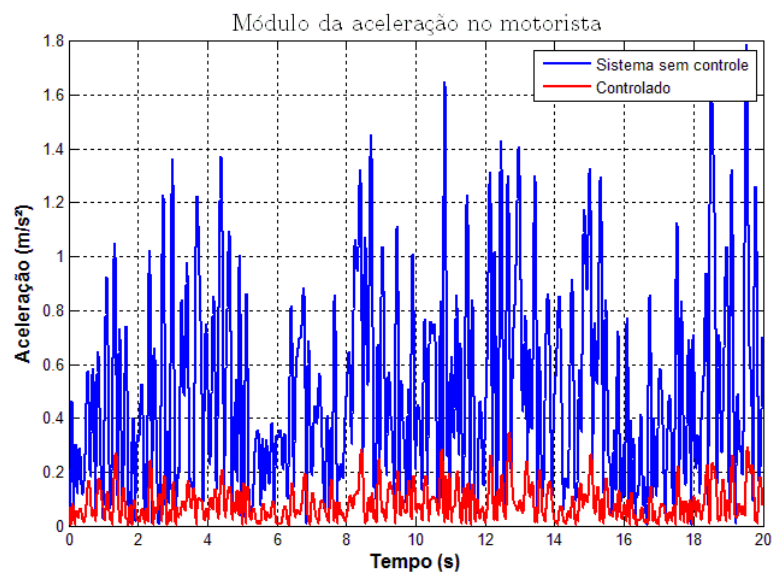


Figura 149 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe D para o modelo de carro completo

Assim como ocorreu uma grande redução nas acelerações a que a carroceria era submetida, houve uma grande redução nas acelerações no motorista. A partir dos valores da aceleração no motorista, foram aplicados os métodos descritos no item 2.3 da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Foram avaliadas as acelerações nas direções x e z. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 19 e na Tabela 20.

Tabela 19 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe D para vibração vertical para o modelo de carro completo

	Modelo Original	Modelo Controlado
a_w (m/s ²)	0,4206	0,07755
MTVV (m/s ²)	0,5868	0,1076
VDV (m/s ^{1,75})	1,16	0,2156

Tabela 20 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe D para vibração horizontal para o modelo de carro completo

	Modelo Original	Modelo Controlado
a_w (m/s ²)	0,1565	0,02489
MTVV (m/s ²)	0,2707	0,03821
VDV (m/s ^{1,75})	0,4343	0,07332

Para esse caso, as vibrações verticais são levemente desconfortáveis para o modelo sem controle. Nos demais casos, as vibrações se mantêm na faixa que não é desconfortável. Fica evidente a melhora do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu em aproximadamente 80% para todos os tipos de análise.

Outra avaliação de conforto feita foi avaliar a intensidade da vibração para cada frequência. Foi plotado gráfico da Figura 150, que mostra a intensidade da aceleração em cada terço de oitava. Os valores obtidos foram comparados com os limites de exposição informados na norma ISO 2631. Nesse caso, para uma estrada classe D, nota-se que o limite de exposição admitido seria superior a 24 horas.

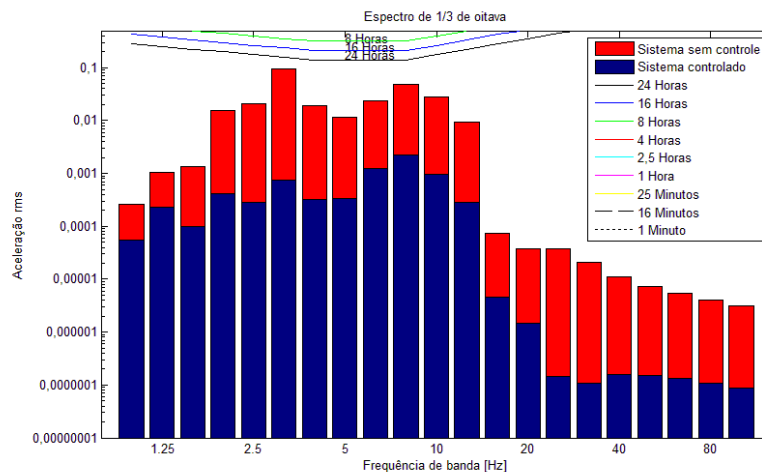


Figura 150 - Comparação da aceleração vertical do motorista em função da frequência para uma estrada perfil D

Assim como no caso da estrada classe A, nota-se que a aceleração para frequências superiores as 20 Hz é bastante atenuada. Nesse caso, nota-se que tanto o sistema controlado, quanto o não controlado geram vibrações cujo limite de exposição é superior a 24 horas.

4.3.5 Estrada classe G

O mesmo procedimento foi repetido para uma estrada classe G. A Figura 151 mostra o perfil de elevação da estrada utilizada para a simulação. Os gráficos da Figura 152 à Figura 158 mostram os resultados das simulações.

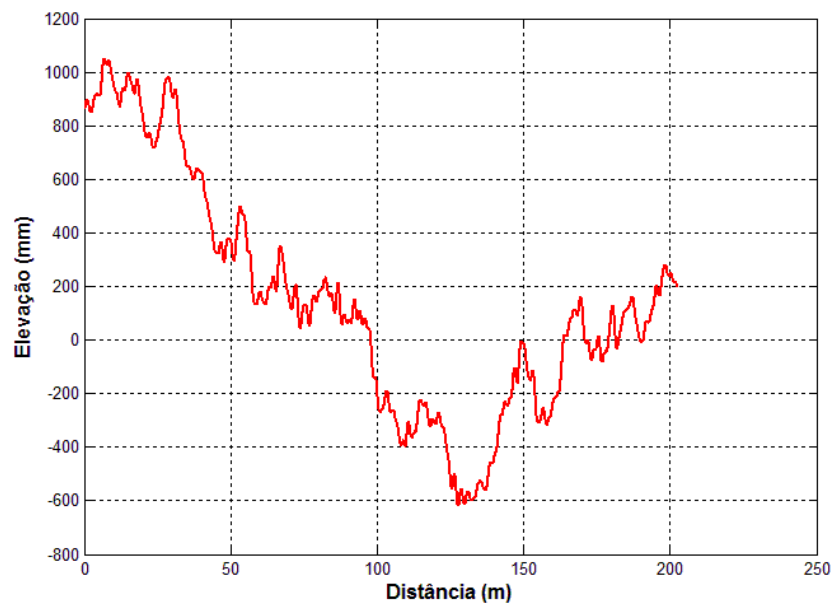


Figura 151 - Perfil de elevação da estrada classe G usada na simulação de carro completo

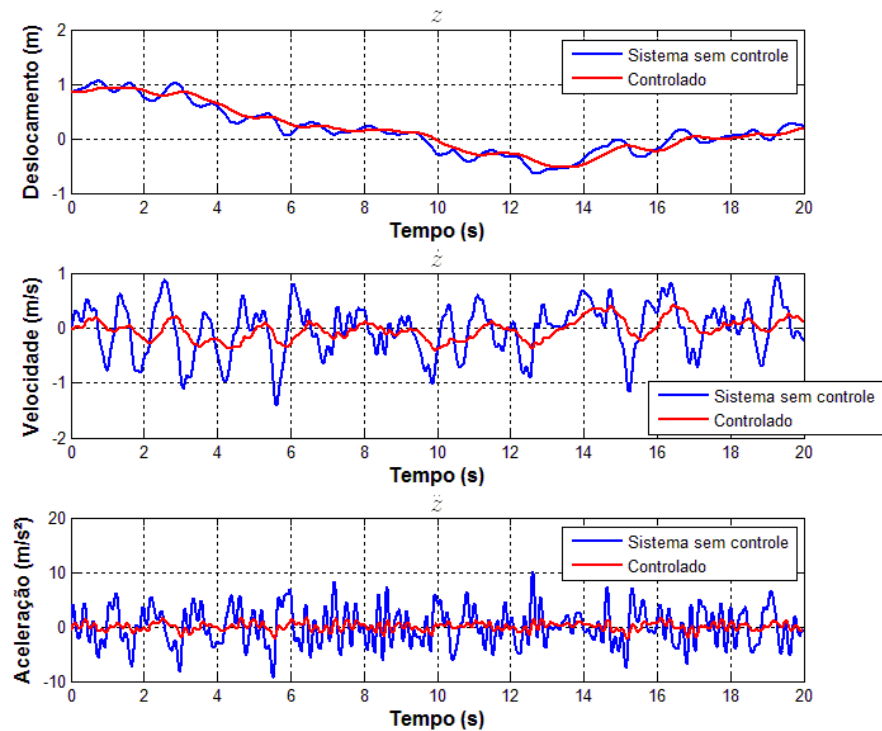


Figura 152 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo

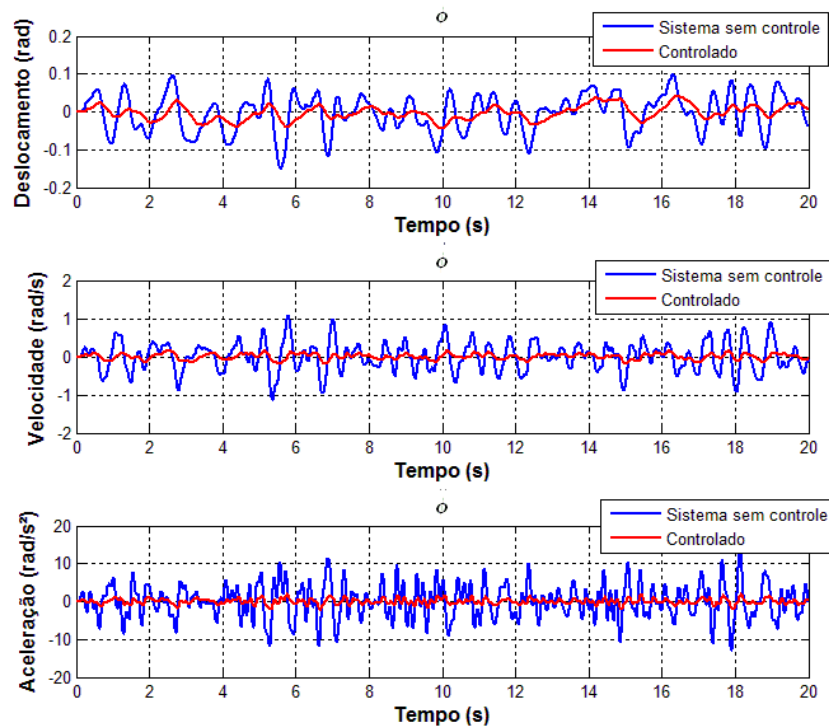


Figura 153 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de arfagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo

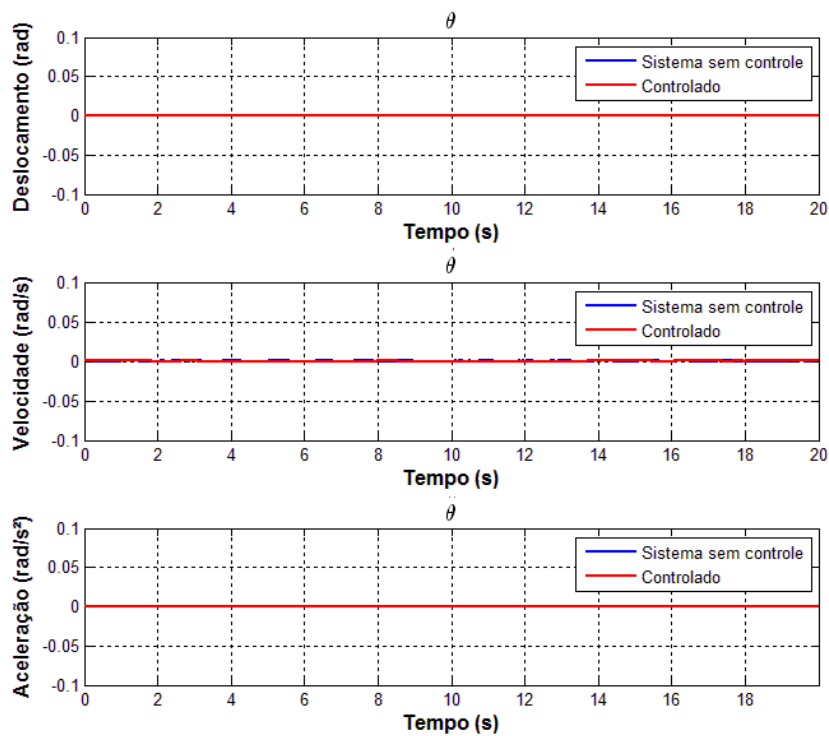


Figura 154 - Comparação do deslocamento, velocidade e aceleração angular de rolagem da massa suspensa entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo

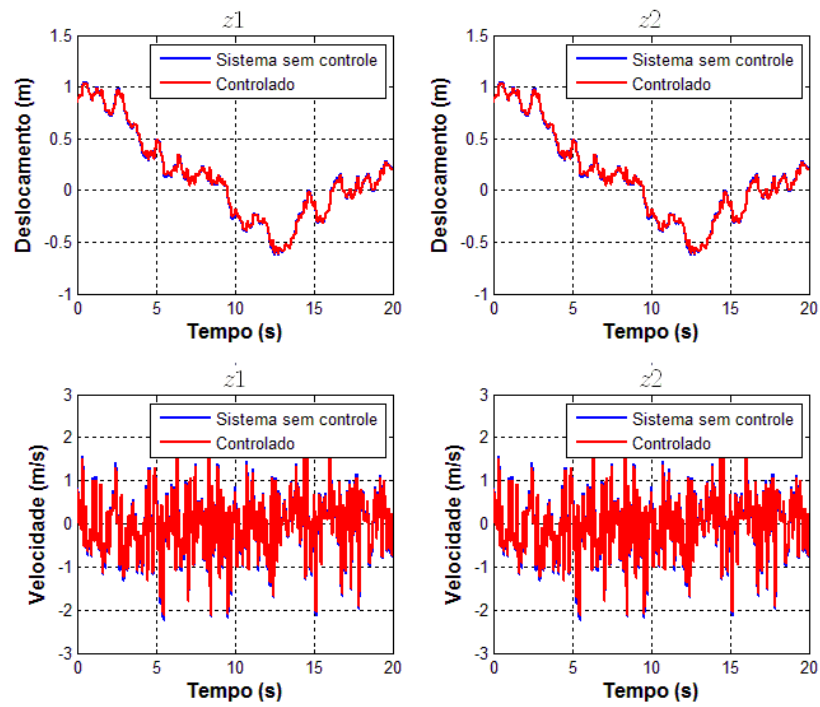


Figura 155 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo

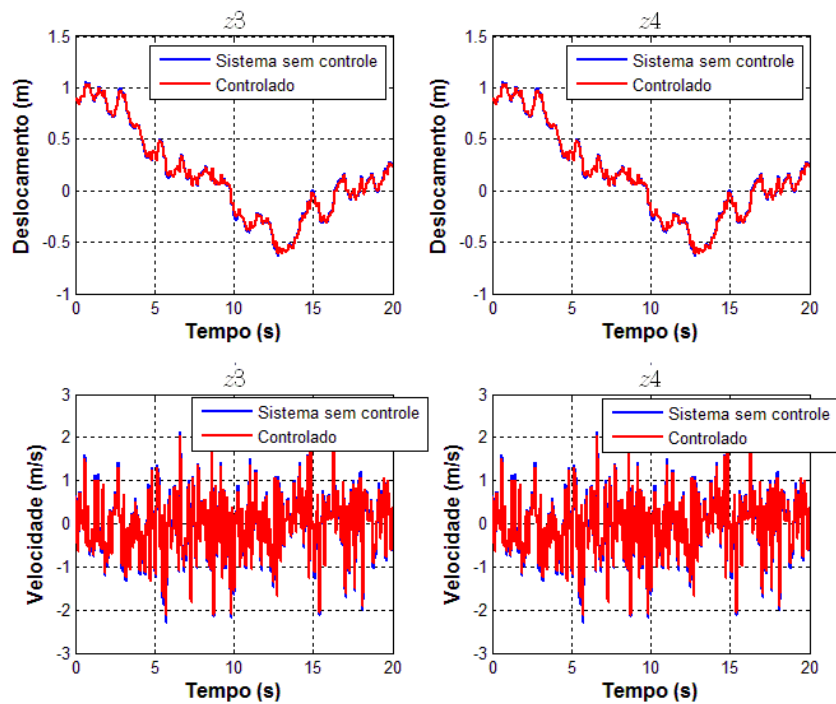


Figura 156 - Comparação do deslocamento e velocidade das rodas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo

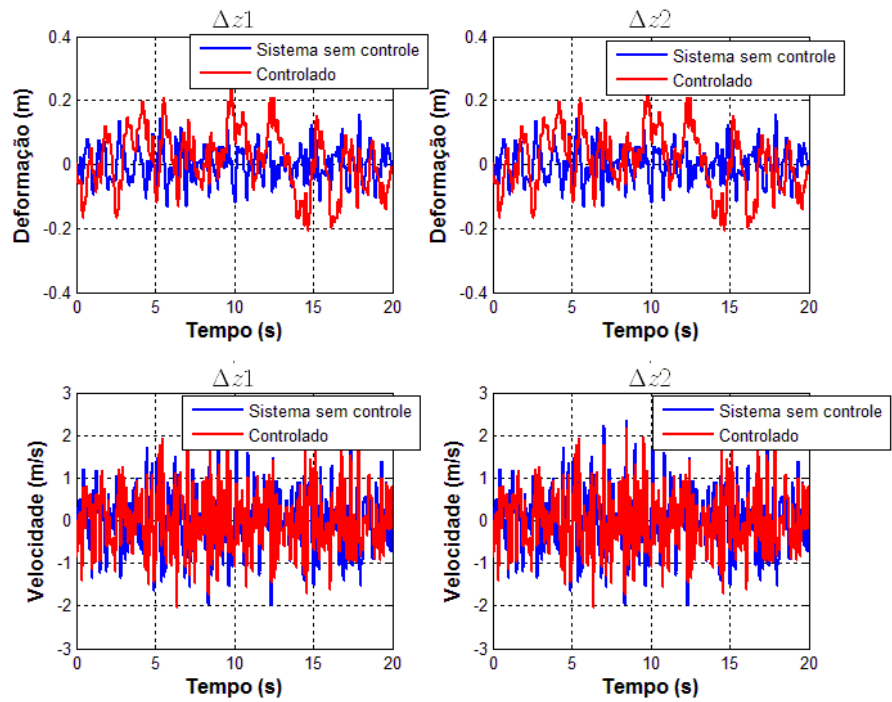


Figura 157 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas dianteiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo carro completo

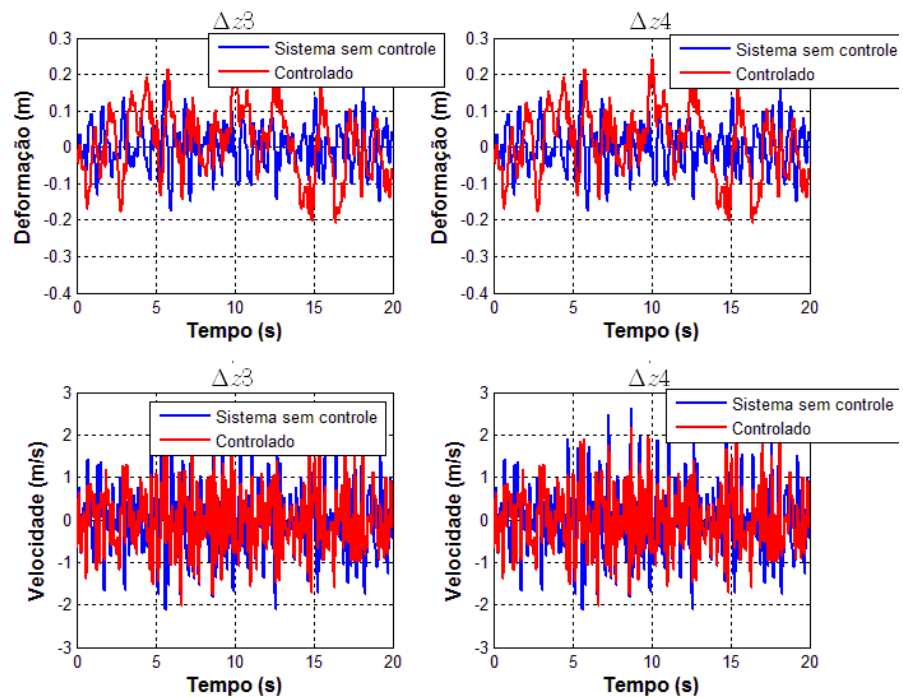


Figura 158 - Comparação das deflexões da molas e das velocidades de deflexão das molas traseiras entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo carro completo

Os deslocamentos, velocidades e acelerações verticais foram suavizados e reduziram de intensidade, o que representa uma melhora significativa no conforto dos ocupantes. Percebe-se também uma grande melhora no comportamento de arfagem do sistema controlado, que apresentou uma grande redução nas acelerações. Como as duas rodas dianteiras e as duas rodas traseiras são excitadas ao mesmo tempo, não há rolagem. O comportamento das massas não suspensas praticamente não foi alterado. Já o comportamento das molas foi bastante modificado, devido à mudança de comportamento da carroceria. O comportamento foi semelhante ao caso da estrada classe A e D.

Além das análises da carroceria e das rodas, foi utilizada metodologia explicada no item 3.1.3 e foram plotados gráficos de deslocamento, velocidade e acelerações a que o motorista é submetido, para a posição adotada. Os resultados podem ser vistos na Figura 159, Figura 160 e Figura 161.

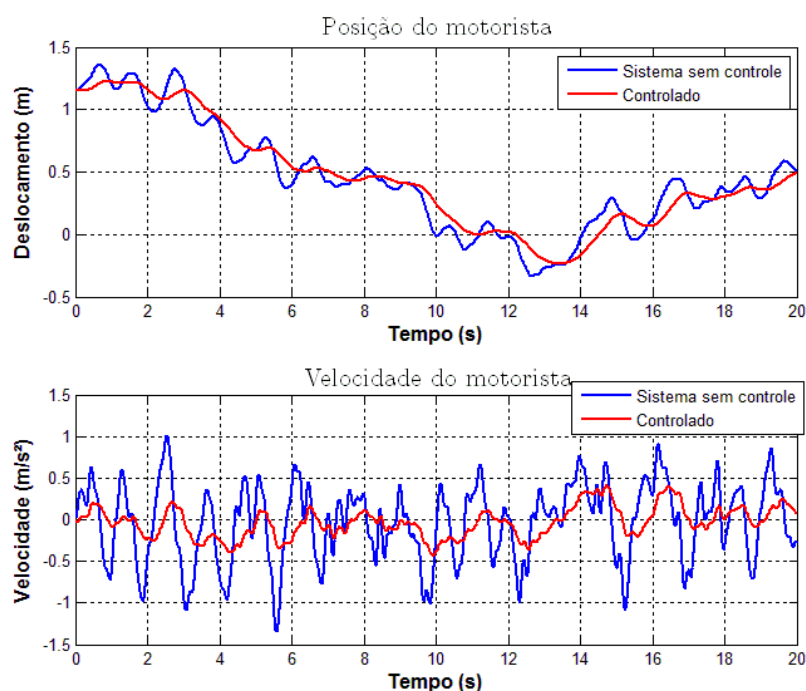


Figura 159 - Comparação do deslocamento e velocidade do motorista entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo

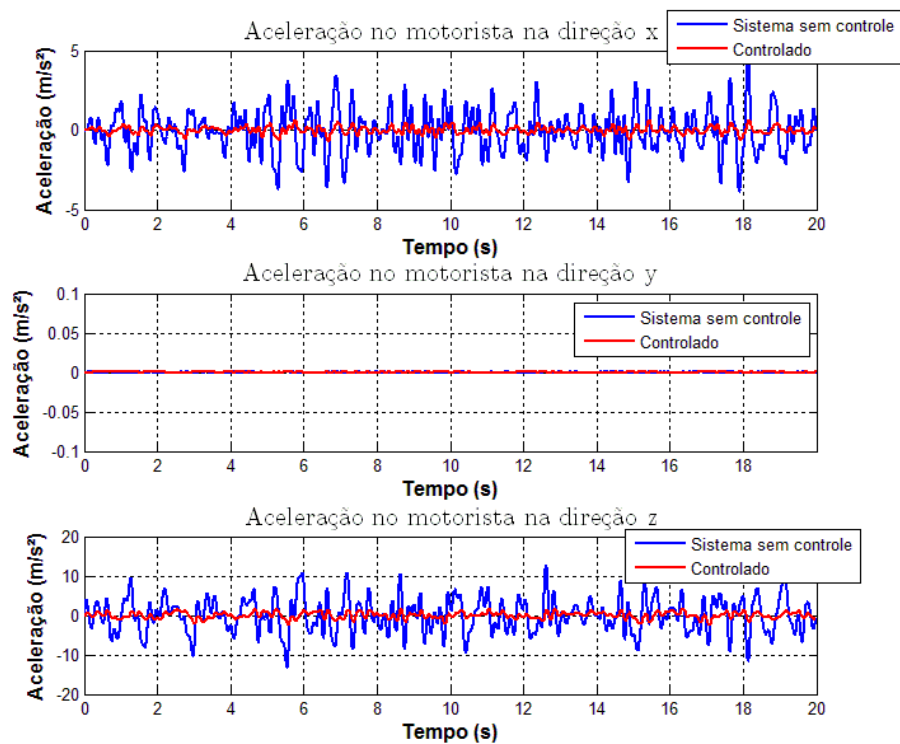


Figura 160 - Comparação das acelerações a que o motorista fica sujeito nas diferentes direções entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo

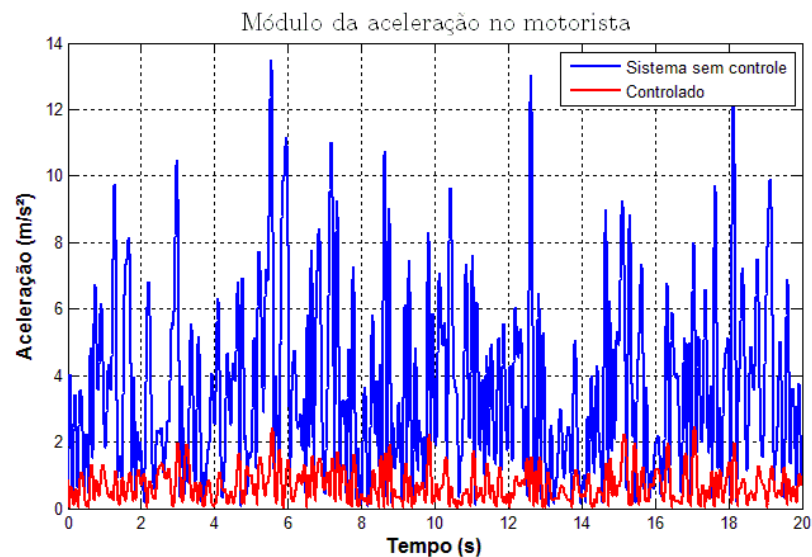


Figura 161 - Comparação da norma das acelerações a que o motorista fica sujeito entre o sistema original e o controlado para uma estrada classe G para o modelo de carro completo

Assim como ocorreu uma grande redução nas acelerações a que a carroceria era submetida, houve uma grande redução nas acelerações no motorista. A partir dos

valores da aceleração no motorista, foram aplicados os métodos descritos no item 2.3 da norma ISO 2631 para avaliar o ganho de conforto. Foram avaliadas as acelerações nas direções x e z. Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 21 e na Tabela 22.

Tabela 21 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe G para vibração vertical para o modelo de carro completo

	Modelo Original	Modelo Controlado
a_w (m/s ²)	3,107	0,6503
MTVV (m/s ²)	4,295	0,7848
VDV (m/s ^{1,75})	8,661	1,689

Tabela 22 - Avaliação do conforto de acordo com a norma ISO 2631 para uma estrada classe G para vibração horizontal para o modelo de carro completo

	Modelo Original	Modelo Controlado
a_w (m/s ²)	1,133	0,1789
MTVV (m/s ²)	1,9	0,2919
VDV (m/s ^{1,75})	3,186	0,5061

A estrada simulada nesse caso é extremamente acidentada e gera valores extremamente desconfortáveis para vibração vertical para o modelo original. Mesmo os valores da vibração horizontal são considerados desconfortáveis. No caso do modelo controlado há uma melhora significativa do conforto, uma vez que o valor eficaz da aceleração reduziu entre 75 e 80%. A vibração vertical para o caso do modelo controlado é considerada levemente desconfortável.

Outra avaliação de conforto feita foi avaliar a intensidade da vibração para cada frequência. Foi plotado gráfico da Figura 162, que mostra a intensidade da aceleração em cada terço de oitava. Os valores obtidos foram comparados com os limites de exposição informados na norma ISO 2631. Nota-se que para o modelo não controlado o limite de exposição é inferior a 16 minutos. No caso do modelo controlado esse limite aumenta para mais de 24 horas, evidenciando o ganho de conforto.

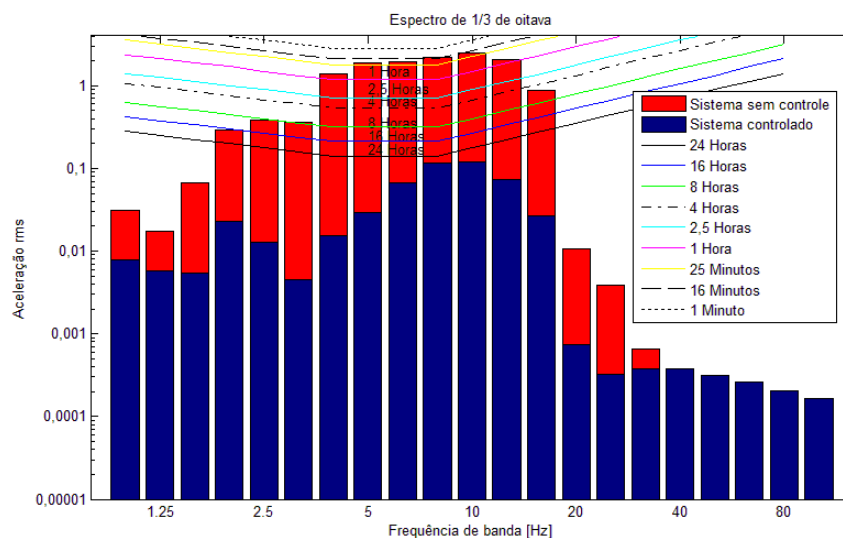


Figura 162 - Comparação da aceleração vertical do motorista em função da frequência para uma estrada perfil G

Nota-se que a aceleração para frequências superiores as 20 Hz é bastante atenuada. Nesse caso, nota-se que o sistema sem controle gera acelerações tão intensas que o limite de exposição é de 16 minutos. Para o caso controlado, as acelerações são atenuadas e o limite aumenta para mais de 24 horas.

5 **Conclusões**

A partir dos resultados obtidos para as simulações para os 3 modelos desenvolvidos ($\frac{1}{4}$ de carro, $\frac{1}{2}$ carro e carro completo) é possível concluir que o objetivo do trabalho foi atingido. Nota-se uma melhora significativa na resposta dinâmica do veículo e conseqüentemente no conforto dos passageiros. Essa melhora pode ser observada nos gráficos pela redução das acelerações a que o veículo fica sujeito e também pela avaliação pelos critérios da norma ISO 2631.

Um aspecto que pode ser melhorado é a resposta do sistema de $\frac{1}{2}$ carro ao movimento de arfagem, que não apresentou uma melhora tão significativa. As acelerações angulares também são bastante danosas ao conforto dos passageiros.

Uma simplificação adotada, mas que poderia melhorar os resultados seria incorporar a dinâmica do atuador magneto-reológico descrita no item 2.5. Essa simplificação foi adotada devido à grande complexidade dos modelos do atuador.

Uma análise que não foi tão aprofundada por escapar do escopo do projeto que era o projeto do sistema de controle para conforto é o do comportamento das molas. No caso do modelo de carro completo com entrada senoidal defasada entre as rodas da direita e da esquerda houve um aumento da deformação da mola. Isso pode exigir modificações dos componentes da suspensão para que tenham durabilidade.

5.1 **Sugestões para trabalhos futuros**

- Incluir a dinâmica do atuador magneto-reológico no modelo;
- Avaliar a influência do sistema controlado nas molas da suspensão e outras peças como os pontos de fixação na carroceria;
- Desenvolver um estudo sobre a viabilidade de se realizar a construção de um protótipo, considerando restrições geométricas e construtivas.

6 **Bibliografia**

Agostinacchio, M., Ciampa, D., & Olita, S. (Setembro de 2014). The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach. *European Transport Research Review* , 267-275.

Anderson, B. D., & Moore, J. B. (1989). *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. Canberra, Australia: Prentice-Hall International, Inc.

Balluff. (5 de Janeiro de 2015). *Sensores magneto indutivos*. Acesso em 15 de Abril de 2015, disponível em Balluff: sensors worldwide: <http://www.balluff.com/balluff/MBR/pt/products/overview-magneto-inductive-linear-position-sensors.jsp>

Barbosa, R. S. (2011). Vehicle Dynamic Response Due to Pavement Roughness. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* , 302-307.

Bayrakdar, Ö. (2010). *Random vibration of a road vehicle*. Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, Mechanical Engineering. İzmir: School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology.

Belgacem, W., Berry, A., & Masson, P. (2012). Active vibration control on a quarter-car for cancellation of road noise disturbance. *Journal of Sound and Vibration* , 3240-3254.

Crivellaro, C. (2008). *Controle robusto de suspensão semi-ativa para caminhonetes utilizando amortecedores magneto-reológicos v. 2*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

da Cruz, J. J. (1996). *Controle Robusto Multivariável*. São Paulo: EDUSP.

Darus, R. B. (2008). *Modelling and Control of Active Suspension for a Full Car Model*. Universiti Teknologi Malaysia, Electrical – Mechatronics and Automatic Control. Johor Bahru: Universiti Teknologi Malaysia.

Ferreira, H. T. (2003). *Determinação das frequências naturais e modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional em Matlab-Simulink*. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

- França, L. N., & Matsumura, A. Z. (2001). *Mecânica Geral* (1ª ed.). São Caetano do Sul: Editora Edgard Blücher LTDA.
- Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, EUA: Society of Automotive Engineers, Inc.
- Imaduddin, F., Mazlan, S. A., & Zamzuri, H. (2013). A design and modelling review of rotary magnetorheological damper. *Materials & Design* , 575-591.
- ISO. (1978). ISO 2631: Guide for the evaluation of human exposure to whole body vibration. *ISO - International Organization for Standardization* .
- ISO. (1997). Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration. *ISO - International Organization for Standardization* .
- Junior, L. P. (2006). *Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo MacPherson*. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Engenharia Mecânica. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Kaminsky, P. C. (2000). *Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade*. Livros Técnicos e Científicos S.A.
- Kumar, M. S., & Vijayarangan, S. (2006). Design of LQR controller for active suspension system. *Indian Journal of Engineering & Material Science* , 13, 173-179.
- Mathworks. (Agosto de 2012). *Matlab Central*. Acesso em 10 de Outubro de 2014, disponível em <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/screenshots/6273/original.jpg>
- Meng, J., Chen, Q., & He, R. (2014). Research on Optimal Control for the Vehicle Suspension Based on the Simulated Annealing Algorithm. *Journal of Applied Mathematics* , 1-5.
- Ogata, K. (1997). *Modern Control Engineering* (3rd Edition ed.). New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Paige, C. C. (1981). Properties of Numerical Algorithms Related to Computing Controllability. *IEEE Transactions on Automatic Control* , AC-26, 130-138.
- Randriatefison, N. (2011). Modelling in 2D the roughness of the roads in the equation of the vehicle movement. *HEP-MAD 11 5th High-Energy Physics International Conference In Madagascar* (pp. 25-31). Antananarivo: Inspire HEP.

Regazzi, R. D., & Ximenes, G. M. (2000). A importância da avaliação da vibração no corpo humano . *INMETRO* .

Sanchez, D. F. (2 de Dezembro de 2007). *Joseph Louis Lagrange e o desenvolvimento da Mecânica Clássica*. Acesso em 15 de Abril de 2015, disponível em Instituto de Engenharia Mecânica UNIFEI: http://www.iem.unifei.edu.br/juliano/Download/EME33/Historia/Lagrange/texto_Lagrange.pdf

Shirahatt, A., Prasad, P., Panzade, P., & Kulkarni, M. M. (January-March de 2008). Optimal Design of Passenger Car Suspension for Ride and Road Holding. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering* , 66-76.

Silicon Desingns Inc. (10 de Agosto de 2011). *Benefits and Uses*. Acesso em 16 de Abril de 2015, disponível em Silicons Design Inc.: Advanced Accelerometers Solutions: <http://www.silicondesigns.com/benefits.html>

Türkay, S., & Akçay, H. (2008). Aspects of achievable performance for quarter-car active suspensions. *Journal of sound and vibration* , 440-460.

Taghirad, H. D., & Esmailzadeh, E. (1997). Automobile Passenger Comfort Assured Through LQG/LQR Active Suspension. *Journal of Vibration and Control* , 1-19.

Thompson, A. G. (1979). An optimal suspension for an automobile on a random road. *SAE* , 12.

Unger, A., Schimmack, F., Lohmann, B., & Schwarz, R. (2011). Application of LQ based semi-active suspension control in a vehicle. *Preprints of the 18th IFAC World Congress* (pp. 1808-1813). Milano: IFAC World Congress.

Wen, Y. K. (1976). Method of random vibration of hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics* , 249-263.

7 Anexo A – Matrizes

Matriz A do modelo de ½ carro.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{(k_1 + k_2)}{M} & -\frac{(c_1 + c_2)}{M} & -\frac{(k_1 * a_1 - k_2 * a_2)}{M} & \frac{(c_1 * a_1 - c_2 * a_2)}{M} & \frac{k_1}{M} & \frac{c_1}{M} & \frac{k_2}{M} & \frac{c_2}{M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(k_1 * a_1 - k_2 * a_2)}{I} & \frac{(c_1 * a_1 - c_2 * a_2)}{I} & -\frac{(k_1 * a_1^2 + k_2 * a_2^2)}{I} & -\frac{(c_1 * a_1^2 + c_2 * a_2^2)}{I} & -\frac{k_1 * a_1}{I} & -\frac{c_1 * a_1}{I} & \frac{k_2 * a_2}{I} & \frac{c_2 * a_2}{I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & -\frac{k_1 * a_1}{m_1} & -\frac{c_1 * a_1}{m_1} & -\frac{k_1 + k_{t1}}{m_1} & -\frac{c_1 + c_{t1}}{m_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & \frac{k_2 * a_2}{m_2} & \frac{c_2 * a_2}{m_2} & 0 & 0 & -\frac{k_2 + k_{t2}}{m_2} & -\frac{c_2 + c_{t2}}{m_2} \end{bmatrix}$$

Matriz A do modelo do carro completo.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{0}{(k_1 + k_2 + k_3 + k_4)} & \frac{1}{(c_1 + c_2 + c_3 + c_4)} & \frac{0}{b_2 * (k_2 + k_4) - b_1 * (k_3 + k_1)} & \frac{0}{b_2 * (c_2 + c_4) - b_1 * (c_3 + c_1)} & \frac{0}{a_2 * (k_3 + k_4) - a_1 * (k_2 + k_1)} & \frac{0}{a_2 * (c_3 + c_4) - a_1 * (c_2 + c_1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0}{M} & \frac{0}{M} & \frac{0}{M} & \frac{0}{M} & \frac{0}{M} & \frac{0}{M} & \frac{k_1}{M} & \frac{c_1}{M} & \frac{k_2}{M} & \frac{c_2}{M} & \frac{k_3}{M} & \frac{c_3}{M} & \frac{k_4}{M} & \frac{c_4}{M} \\ \frac{0}{b_2 * (k_2 + k_4) - b_1 * (k_3 + k_1)} & \frac{0}{b_2 * (c_2 + c_4) - b_1 * (c_3 + c_1)} & \frac{0}{b_2^2 * (k_2 + k_4) + b_1^2 * (k_3 + k_1)} & \frac{0}{b_2^2 * (c_2 + c_4) + b_1^2 * (c_3 + c_1)} & \frac{0}{(-k_1 * a_1 * b_1 + k_3 * a_2 * b_1 + k_2 * a_1 * b_2 - k_4 * a_2 * b_2)} & \frac{0}{(-c_1 * a_1 * b_1 + c_3 * a_2 * b_1 + c_2 * a_1 * b_2 - c_4 * a_2 * b_2)} & \frac{k_1 * b_1}{I_x} & \frac{c_1 * b_1}{I_x} & \frac{k_2 * b_2}{I_x} & \frac{c_2 * b_2}{I_x} & \frac{k_3 * b_1}{I_x} & \frac{c_3 * b_1}{I_x} & \frac{k_4 * b_2}{I_x} & \frac{c_4 * b_2}{I_x} \\ \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} & \frac{0}{I_x} \\ \frac{0}{a_2 * (k_3 + k_4) - a_1 * (k_2 + k_1)} & \frac{0}{a_2 * (c_3 + c_4) - a_1 * (c_2 + c_1)} & \frac{0}{(k_3 * a_2 * b_1 - k_4 * a_2 * b_2 - k_1 * a_1 * b_1 + k_2 * a_1 * b_2)} & \frac{0}{(c_3 * a_2 * b_1 - c_4 * a_2 * b_2 - c_1 * a_1 * b_1 + c_2 * a_1 * b_2)} & \frac{0}{a_2^2 * (k_3 + k_4) + a_1^2 * (k_2 + k_1)} & \frac{0}{a_2^2 * (c_3 + c_4) + a_1^2 * (c_2 + c_1)} & \frac{k_1 * a_1}{I_y} & \frac{c_1 * a_1}{I_y} & \frac{k_2 * a_1}{I_y} & \frac{c_2 * a_1}{I_y} & \frac{k_3 * a_2}{I_y} & \frac{c_3 * a_2}{I_y} & \frac{k_4 * a_2}{I_y} & \frac{c_4 * a_2}{I_y} \\ \frac{I_y}{0} & \frac{I_y}{0} & \frac{I_y}{0} & \frac{I_y}{0} & \frac{I_y}{0} & \frac{I_y}{0} & \frac{0}{0} & \frac{0}{0} & \frac{0}{0} & \frac{0}{0} & \frac{0}{0} & \frac{0}{0} & \frac{0}{0} & \frac{0}{0} \\ \frac{k_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & \frac{k_1 * b_1}{m_1} & \frac{c_1 * b_1}{m_1} & \frac{k_1 * a_1}{m_1} & \frac{c_1 * a_1}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{1}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} \\ \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \frac{0}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & \frac{k_2 * b_2}{m_2} & \frac{c_2 * b_2}{m_2} & \frac{k_2 * a_1}{m_2} & \frac{c_2 * a_1}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{k_{12}}{m_2} & \frac{c_{12}}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} \\ \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} & \frac{0}{m_2} \\ \frac{k_3}{m_3} & \frac{c_3}{m_3} & \frac{k_3 * b_1}{m_3} & \frac{c_3 * b_1}{m_3} & \frac{k_3 * a_2}{m_3} & \frac{c_3 * a_2}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{k_{13}}{m_3} & \frac{c_{13}}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} \\ \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} & \frac{0}{m_3} \\ \frac{k_4}{m_4} & \frac{c_4}{m_4} & \frac{k_4 * b_2}{m_4} & \frac{c_4 * b_2}{m_4} & \frac{k_4 * a_2}{m_4} & \frac{c_4 * a_2}{m_4} & \frac{0}{m_4} & \frac{0}{m_4} & \frac{0}{m_4} & \frac{0}{m_4} & \frac{0}{m_4} & \frac{0}{m_4} & \frac{k_{14}}{m_4} & \frac{c_{14}}{m_4} \end{bmatrix}$$

Matriz V para o modelo de ½ carro.

$$V = \begin{bmatrix} -0,0005 + 0,0003i & -0,0005 - 0,0003i & 0,0001 - 0,0001i & 0,0001 + 0,0001i & -0,0094 - 0,0507i & -0,0094 + 0,0507i & -0,0263 - 0,1191i & -0,0263 + 0,1191i \\ -0,0151 - 0,0370i & -0,0151 + 0,0370i & 0,0035 + 0,0082i & 0,0035 - 0,0082i & 0,3468 & 0,3468 & 0,9671 & 0,9671 \\ -0,0001 + 0,0001i & -0,0001 - 0,0001i & -0,0003 + 0,0002i & -0,0003 - 0,0002i & 0,0248 + 0,1335i & 0,0248 - 0,1335i & -0,0048 - 0,0217i & -0,0048 + 0,0217i \\ -0,0028 - 0,0067i & -0,0028 + 0,0067i & -0,0091 - 0,0215i & -0,0091 + 0,0215i & -0,9135 & -0,9135 & 0,1762 & 0,1762 \\ -0,0015 - 0,0076i & -0,0015 + 0,0076i & 0,0024 + 0,0119i & 0,0024 - 0,0119i & 0,0036 - 0,0190i & 0,0036 + 0,0190i & 0,0020 - 0,0088i & 0,0020 + 0,0088i \\ 0,5352 & 0,5352 & -0,8441 & -0,8441 & 0,1211 - 0,0471i & 0,1211 + 0,0471i & 0,0649 + 0,0305i & 0,0649 - 0,0305i \\ -0,0024 - 0,0119i & -0,0024 + 0,0119i & -0,0015 - 0,0076i & -0,0015 + 0,0076i & -0,0023 + 0,0120i & -0,0023 - 0,0120i & 0,0032 - 0,0139i & 0,0032 + 0,0139i \\ 0,8436 & 0,8436 & 0,5355 - 0,0000i & 0,5355 + 0,0000i & -0,0768 - 0,0299i & -0,0768 + 0,0299i & 0,1023 + 0,0481i & 0,1023 - 0,0481i \end{bmatrix}$$

8 Anexo B - Código do programa

Modelo 1D

```
%Programa para o modelo 1D

clear all %Limpeza das variáveis

%Definições das constantes

k1=16000;
k2=160000;
c1=960;
c2=0;
M=240;
m=36;
A=[0 1 0 0; -k1/M -c1/M k1/M c1/M ; 0 0 0 1 ; k1/m c1/m -(k2+k1)/m -
(c2+c1)/m];
B=[ 0 ; 0 ; 0 ; k2/m ];
C=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
D=0;
sys=ss(A,B,C,D);

%Função elaborada para plotar os gráficos 1D de acordo com cada entrada

graph1d(sys,0,0.001,4,2) %1= inicial zero , 2=incial deslocado 0.1m em x1
, 3= step , 4= senoidal
damp(sys)
[V,D]=eig(A);
```

Modelo 2D

```
%Programa para o modelo 2D

clear all %Limpeza das variáveis

%Definições das constantes

k1=16000;
k2=k1;
kt1=160000;
kt2=kt1;
c1=960;
c2=c1;
ct1=0;
ct2=ct1;
M=480;
m1=36;
m2=m1;
a1=1.15;
a2=1.35;
I=1000;

%Matriz A no Espaço de estados
A=[0 1 0 0 0 0 0 0 ;-(k1+k2)/M -(c1+c2)/M (k1*a1-k2*a2)/M (c1*a1-c2*a2)/M
k1/M c1/M k2/M c2/M ; 0 0 0 1 0 0 0 0 ; (k1*a1-k2*a2)/I (c1*a1-c2*a2)/I -
(k1*a1*a1+k2*a2*a2)/I -(c1*a1*a1+c2*a2*a2)/I -k1*a1/I -c1*a1/I k2*a2/I
c2*a2/I ; 0 0 0 0 0 1 0 0 ; k1/m1 c1/m1 -k1*a1/m1 -c1*a1/m1 -(kt1+k1)/m1
-(ct1+c1)/m1 0 0 ; 0 0 0 0 0 0 0 1 ; k2/m2 c2/m2 k2*a2/m2 c2*a2/m2 0 0 -
(kt2+k2)/m2 -(ct2+c2)/m2];

%Matriz B no Espaço de estados
B=[0 0 ;0 0 ;0 0 ;0 0;0 0;kt1/m1 0 ; 0 0;0 kt2/m2];

%Matriz C no Espaço de estados
C=eye(8);

%Matriz D no Espaço de estados
D=0;

%Sistema no Espaço de estados
sys=ss(A,B,C,D);
v=10; %Velocidade do veículo

%Função elaborada para plotar os gráficos 2D de acordo com cada entrada

graph2d(sys,0,.001,6,4,a1,a2,v)
[V,D]=eig(A);
Damp(sys)
```

Modelo 3D

```
%%Programa para o modelo 3D
```

```
clear all %Limpeza das variáveis
```

```
%Definições das constantes
```

```
k1=16000;  
k2=16000;  
k3=16000;  
k4=16000;  
kt1=160000;  
kt2=160000;  
kt3=160000;  
kt4=160000;  
c1=960;  
c2=960;  
c3=960;  
c4=960;  
ct1=0;  
ct2=0;  
ct3=0;  
ct4=0;  
M=960;  
m1=36;  
m2=36;  
m3=36;  
m4=36;  
a1=1.15;  
a2=1.35;  
b1=0.7;  
b2=0.7;  
Iy=1000;  
Ix=1000;  
v=10; %Velocidade do veículo
```

```
%Matriz A no Espaço de estados
```

```
A= [0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;  
-(k1+k2+k3+k4)/M -(c1+c2+c3+c4)/M (-b1*(k1+k3)+b2*(k2+k4))/M (-  
(c1+c3)*b1+(c4+c2)*b2)/M (-a1*(k1+k2)+a2*(k3+k4))/M (-  
a1*(c1+c2)+a2*(c3+c4))/M k1/M c1/M k2/M c2/M k3/M c3/M k4/M c4/M ;  
0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ;  
(-b1*(k3+k1)+b2*(k2+k4))/Ix (-b1*(c3+c1)+b2*(c2+c4))/Ix -  
(b1*b1*(k1+k3)+b2*b2*(k2+k4))/Ix -(b1*b1*(c1+c3)+b2*b2*(c2+c4))/Ix (-  
k1*a1*b1+k3*a2*b1+k2*a1*b2-k4*a2*b2)/Ix (-c1*a1*b1+c3*a2*b1+c2*a1*b2-  
c4*a2*b2)/Ix k1*b1/Ix c1*b1/Ix -k2*b2/Ix -c2*b2/Ix k3*b1/Ix c3*b1/Ix -  
k4*b2/Ix -c4*b2/Ix;  
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0;  
-(a1*(k1+k2)-a2*(k3+k4))/Iy -(a1*(c1+c2)-a2*(c3+c4))/Iy -(-  
k3*a2*b1+k4*a2*b2+k1*a1*b1-k2*a1*b2)/Iy -(-c3*a2*b1+c4*a2*b2+c1*a1*b1-  
c2*a1*b2)/Iy -(a2^2*(k3+k4)+a1^2*(k1+k2))/Iy -  
(a2^2*(c3+c4)+a1^2*(c1+c2))/Iy k1*a1/Iy c1*a1/Iy k2*a1/Iy c2*a1/Iy -  
k3*a2/Iy -c3*a2/Iy -k4*a2/Iy -c4*a2/Iy;  
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0;
```

```

    k1/m1 c1/m1 k1*b1/m1 c1*b1/m1 k1*a1/m1 c1*a1/m1 -(kt1+k1)/m1 -
(ct1+c1)/m1 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;
    k2/m2 c2/m2 -k2*b2/m2 -c2*b2/m2 k2*a1/m2 c2*a1/m2 0 0 -(kt2+k2)/m2 -
(ct2+c2)/m2 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;
    k3/m3 c3/m3 k3*b1/m3 c3*b1/m3 -k3*a2/m3 -c3*a2/m3 0 0 0 0 -(kt3+k3)/m3
-(ct3+c3)/m3 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;
    k4/m4 c4/m4 -k4*b2/m4 -c4*b2/m4 -k4*a2/m4 -c4*a2/m4 0 0 0 0 0 0 -
(kt4+k4)/m4 -(ct4+c4)/m4];];

```

%Matriz B no Espaço de estados

```

B=[0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    kt1/m1 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 kt2/m2 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 kt3/m3 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 kt4/m4];

```

**%Matriz C no Espaço de estados sem erros de medidas e medindo todas as
%variáveis**

```
C=eye(14);
```

%Matriz D

```
D=0;
```

%Determinação do sistema no espaço de estados

```
sys=ss(A,B,C,D);
```

%Função elaborada para plotar os gráficos 3D de acordo com cada entrada

```

gra3d(sys,0,0.001,4,2,a1,a2,b1,b2,v); % 5 elemento do parenteses 1=
inicial zero , 2=inicial deslocado .1m em x1 , 3= step , 4= senoidal, 7=
senoidal deslocado

```

```
[V,G]=eig(A);
```

```
Damp(sys);
```

Controle 1D

```
%Programa utilizado na sintonização e simulação do sistema de controle

clear all %Limpeza de variáveis

%Definição das constantes

k1=16000;
k2=160000;
c1=960;
c2=0;
M=240;
m=36;
A=[0 1 0 0; -k1/M -c1/M k1/M c1/M ; 0 0 0 1 ; k1/m c1/m -(k2+k1)/m -
(c2+c1)/m];
B=[0;0;0;k2/m];
C=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
D=0;
v=10; %velocidade do veículo
perfil=9; %Definição do perfil de estrada
Gd_w0=131072 * 10^-6; %GD de w0 do perfil da estrada
sys=ss(A,B,C,D); %Sistema em espaço de estados

Q=[1 0 0 0; 0 80 0 0 ; 0 0 1 0;0 0 0 80]; %Matriz Q
R=[5]; %Matriz Q

[K,S,e]=lqr(sys,Q,R); %Determinação do ganho do sistema pelo método LQR

B2=[0 1 0 -1]' ; %Matriz B do sistema controlado
A3=A-B2*K; %Matriz A do Sistema controlado
B3=[0 0 0 k2/m]' ;

sys3=ss(A3 , B , C , D); %Sistema COntrolado
graph1dcontr(sys,sys3,0,.01,10,3); %Função utilizada para
% sintonizar o sistema
    damp(sys)
    damp(sys3)

% Observador de estados
    C4=[1 0 -1 0; 0 1 0 0];
    obs=[C4' A'*C4' A'*A'*C4' A'*A'*A'*C4']; %matriz de
observabilidade
    cont=[B A*B A*A*B A*A*A*B]; %matriz de
controlabilidade
    rank(obs) %Determinação do
posto(rank) da matriz de observabilidade
    rank(cont) %Determinação do
posto(rank) da matriz de controlabilidade
    Jobs=[-270+6.37i -270-6.37i -1150+68.9i -1150-68.9i]; %polos do
observador
Kolinha=place(A3',C4',Jobs);
Ko=Kolinha';
```

```

%%Kobs=[Ko(1,1) ;Ko(1,3) ; Ko(2,2) ;Ko(2,4)];
A4=[A3 B*K; zeros(size(A3-Ko*C4)) A-Ko*C4];
B4=[B ; zeros(size(B))];
C5=[eye(4) zeros(4) ];

sys4=ss(A4 , B4 , C5 , [0 ;0 ; 0; 0]);

graph1dobs(sys,sys4,0,.001,15,v,perfil,Gd_w0,5); %Gráfico do sistema
controlado com observador

```

Controle 2D

```
%Programa utilizado na sintonização e simulação do sistema de controle

clear all %Limpeza de variáveis

%Definição das constantes

k1=16000;
k2=k1;
kt1=160000;
kt2=kt1;
c1=960;
c2=c1;
ct1=0;
ct2=ct1;
M=480;
m1=36;
m2=m1;
a1=1.15;
a2=1.35;
I=1000;

%Matrizes A; B; C e D

A=[0 1 0 0 0 0 0 0 ;-(k1+k2)/M -(c1+c2)/M (k1*a1-k2*a2)/M (c1*a1-c2*a2)/M
k1/M c1/M k2/M c2/M ; 0 0 0 1 0 0 0 0 ; (k1*a1-k2*a2)/I (c1*a1-c2*a2)/I -
(k1*a1*a1+k2*a2*a2)/I -(c1*a1*a1+c2*a2*a2)/I -k1*a1/I -c1*a1/I k2*a2/I
c2*a2/I ; 0 0 0 0 0 1 0 0 ; k1/m1 c1/m1 -k1*a1/m1 -c1*a1/m1 -(kt1+k1)/m1
-(ct1+c1)/m1 0 0 ; 0 0 0 0 0 0 0 1 ; k2/m2 c2/m2 k2*a2/m2 c2*a2/m2 0 0 -
(kt2+k2)/m2 -(ct2+c2)/m2];
B=[0 0;0 0;0 0;0 0;0 0;kt1/m1 0;0 0;0 kt2/m2];
C=eye(8);
D=0;

%Sistema em espaço de estados

sys=ss(A,B,C,D);

%Velocidade do veículo

v=10;

%Perfil de estrada e seu respectivo Gd W0

perfil=9;
Gd_w0=131072 * 10^-6;

%matrizes Q e R
```

```

Q=[1 0 0 0 0 0 0 0; 0 80 0 0 0 0 0 0; 0 0 1 0 0 0 0 0; 0 0 0 40 0 0 0 0
; 0 0 0 0 1 0 0 0; 0 0 0 0 0 5 0 0; 0 0 0 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 0 0 0 5];
R=[1 0; 0 1];

%Ganhos do sistema

[K,S,e]=lqr(sys,Q,R);

%Matrizes B e A do sistema controlado

B2=[0 1 0 -a1 0 -1 0 0; 0 1 0 a2 0 0 0 -1]';
A3=A-B2*K;
B3=[0 0; 0 0; 0 0; 0 0; kt1/m1 0; 0 0; 0 kt2/m2];

% sistema utilizado para sintonização de Q e R e seu respectivo plot

sys3=ss(A3 , B3 , C , D);
graph2dcontr(sys,sys3,0,.0001,5,a1,a2,v,3);
    damp(sys)
    damp(sys3)

%          Observador de estados

%matriz C do observador com relação aos seus estados medidos

C4=[0 1 0 0 0 0 0 0; 0 0 1 0 0 0 0 0; 0 0 0 1 0 0 0 0; 1 0 -a1 0
-1 0 0 0; 1 0 a2 0 0 0 -1 0];
obs=[C4' A'*C4' A'*A'*C4' A'*A'*A'*C4' A'*A'*A'*A'*C4'
A'*A'*A'*A'*A'*C4' A'*A'*A'*A'*A'*A'*C4' A'*A'*A'*A'*A'*A'*A'*C4'];
%matriz de observabilidade
cont=[B A*B A*A*B A*A*A*B A*A*A*A*B A*A*A*A*A*B A*A*A*A*A*A*B
A*A*A*A*A*A*A*B]; %matriz de controlabilidade
rank(obs) %Determinação do
posto(rank) da matriz de observabilidade
rank(cont) %Determinação do
posto(rank) da matriz de controlabilidade
Jobs=[-6.95 -10.87 -20.74 -9.83 -12.3+68.8i -12.3-68.8i -
12.2+69.6i -12.2-69.6i]; %polos adotados para controle por alocação de
polos
Kolinha=place(A3',C4',Jobs);
Ko=Kolinha';
A4=[A3 B*K; zeros(size(A3-Ko*C4)) A-Ko*C4];
B4=[B ; zeros(size(B))];
C5=[eye(8) zeros(8) ];

%simulação do sistema descrito acima com o sistema sem controle

sys4=ss(A4 , B4 , C5 , [0 0; 0 0; 0 0; 0 0; 0 0; 0 0; 0 0]);

graph2dobs(sys,sys4,0,.001,10,a1,a2,v,perfil,Gd_w0,5);

```

Controle 3D

%Programa utilizado na sintonização e simulação do sistema de controle

clear all %Limpeza de variáveis

%Definição das constantes

```
k1=16000;
k2=16000;
k3=16000;
k4=16000;
kt1=160000;
kt2=160000;
kt3=160000;
kt4=160000;
c1=960;
c2=960;
c3=960;
c4=960;
ct1=0;
ct2=0;
ct3=0;
ct4=0;
M=960;
m1=36;
m2=36;
m3=36;
m4=36;
a1=1.15;
a2=1.35;
b1=0.7;
b2=0.7;
Iy=1000;
Ix=1000;
v=10; %Velocidade do veículo
```

%Perfil de estrada e seu respectivo $G_d w_0$

```
perfil=9;
Gd_w0=131072 * 10^-6;
```

%Matrizes A; B; C e D

```
A= [0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    -(k1+k2+k3+k4)/M -(c1+c2+c3+c4)/M (-b1*(k1+k3)+b2*(k2+k4))/M (-
    (c1+c3)*b1+(c4+c2)*b2)/M (-a1*(k1+k2)+a2*(k3+k4))/M (-
    a1*(c1+c2)+a2*(c3+c4))/M k1/M c1/M k2/M c2/M k3/M c3/M k4/M c4/M ;
    0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ;
    (-b1*(k3+k1)+b2*(k2+k4))/Ix (-b1*(c3+c1)+b2*(c2+c4))/Ix -
    (b1*b1*(k1+k3)+b2*b2*(k2+k4))/Ix -(b1*b1*(c1+c3)+b2*b2*(c2+c4))/Ix (-
    k1*a1*b1+k3*a2*b1+k2*a1*b2-k4*a2*b2)/Ix (-c1*a1*b1+c3*a2*b1+c2*a1*b2-
    c4*a2*b2)/Ix k1*b1/Ix c1*b1/Ix -k2*b2/Ix -c2*b2/Ix k3*b1/Ix c3*b1/Ix -
    k4*b2/Ix -c4*b2/Ix;
    0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0;
```

```

    -(a1*(k1+k2)-a2*(k3+k4))/Iy -(a1*(c1+c2)-a2*(c3+c4))/Iy -(-
k3*a2*b1+k4*a2*b2+k1*a1*b1-k2*a1*b2)/Iy -(-c3*a2*b1+c4*a2*b2+c1*a1*b1-
c2*a1*b2)/Iy -(a2^2*(k3+k4)+a1^2*(k1+k2))/Iy -
(a2^2*(c3+c4)+a1^2*(c1+c2))/Iy k1*a1/Iy c1*a1/Iy k2*a1/Iy c2*a1/Iy -
k3*a2/Iy -c3*a2/Iy -k4*a2/Iy -c4*a2/Iy;
    0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0;
    k1/m1 c1/m1 k1*b1/m1 c1*b1/m1 k1*a1/m1 c1*a1/m1 -(kt1+k1)/m1 -
(ct1+c1)/m1 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0;
    k2/m2 c2/m2 -k2*b2/m2 -c2*b2/m2 k2*a1/m2 c2*a1/m2 0 0 -(kt2+k2)/m2 -
(ct2+c2)/m2 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0;
    k3/m3 c3/m3 k3*b1/m3 c3*b1/m3 -k3*a2/m3 -c3*a2/m3 0 0 0 0 -(kt3+k3)/m3
-(ct3+c3)/m3 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1;
    k4/m4 c4/m4 -k4*b2/m4 -c4*b2/m4 -k4*a2/m4 -c4*a2/m4 0 0 0 0 0 0 -
(kt4+k4)/m4 -(ct4+c4)/m4];];

```

```

B=[ 0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    kt1/m1 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 kt2/m2 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 kt3/m3 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 kt4/m4];

```

```
C=eye(14);
```

```
D=0;
```

```
%Definição do sistema em espaço de estados
```

```
sys=ss(A,B,C,D);
```

```
%Definição das matriz B para sintonização do controlador
```

```
B2=[0 1 0 b1 0 a1 0 -1 0 0 0 0 0 0; 0 1 0 -b2 0 a1 0 0 0 -1 0 0 0 0; 0 1
0 b1 0 -a2 0 0 0 0 0 -1 0 0 ; 0 1 0 -b2 0 -a2 0 0 0 0 0 0 0 -1]';
```

```
%Matrizes Q e R
```

```

Q=[.5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ;0 50 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ;0 0 .5 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ;0 0 0 50 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ;0 0 0 0 .5 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 ;0 0 0 0 0 50 0 0 0 0 0 0 0 0 ;0 0 0 0 0 0 .5 0 0 0 0 0 0 0 ;0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 ;0 0 0 0 0 0 0 0 0 .5 0 0 0 0 0 ;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 0 ;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 .5 0 0 0 ;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 ;0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 .5 0 ;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1];

```

```
R=[1 0 0 0; 0 1 0 0 ; 0 0 1 0 ; 0 0 0 1];
```

```
[K,S,e]=lqr(sys,Q,R);
```

```

%Definição das matrizes e simulação do sistema controlado e com todas
%variáveis sendo medidas para a sintonização das matrizes Q e R

A3=A-B2*K;
B3=B;
sys3=ss(A3 , B3 , C , D);
graph3dcontr(sys,sys3,0,.0001,5,a1,a2,b1,b2,v,4);
damp(sys)
damp(sys3)

%      Observador de estados
C4=[0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0
0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0; 1 0 b1 0 a1 0 -1 0 0 0 0 0 0 0 0;1 0 -b2 0 a1 0 0 0 -1 0 0 0 0 0;1
0 b1 0 -a2 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0;1 0 -b2 0 -a2 0 0 0 0 0 0 0 -1 0];
Jobs=[-175 -256 -306 -83100 -1200 -1550 -1290+68.7i -1290-68.7i -
1290+68.7i -1290-68.7i -1280+68.7i -1280-68.7i -1300+68.7i -1300-68.7i];
%polos adotados para controle por alocação de polos
Kolinha=place(A3',C4',Jobs);
Ko=Kolinha';
A4=[A3 B*K; zeros(size(A3-Ko*C4)) A-Ko*C4];
B4=[B ; zeros(size(B))];
C5=[eye(14) zeros(14) ];

sys4=ss(A4 , B4 , C5 , [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]');

graph3dobs(sys,sys4,0,.001,10,a1,a2,b1,b2,v,perfil,Gd_w0,7);

```

Função graph1d

```
function graph1d(sys,ti,dt,tf,tipo)
%é declarada a matriz de tempo

t=ti:dt:tf;

%são plotados os gráficos de acordo com o tipo de entrada desejada,
%1=inicialnulo ; 2= inicial deslocado ; 3=degrau ; 4=senoide
if tipo==1
i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u(1,i+1)=0;

            end
            i=i+1;
        end

    end

if tipo==2
i=0;
    x0=[0.1; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u(1,i+1)=0;

            end
            i=i+1;
        end

    end

if tipo==3
i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if 0<i<=50
            u(1,i+1)=0;
            end
        if i>=50
            u(1,i+1)=.1;
            end
        i=i+1;
    end

end

if tipo==4

i=0;
v=10;
```

```

lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;

while i<=tf/dt
    u(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
    i=i+1;
end

x0=[0; a*w; 0; a*w];

end

[y1,t1]=lsim(sys,u,t,x0);

i=0;

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure (2)

subplot(2,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\{z_1\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

```

```

        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,4), 'b', 'LineWidth', 2);
    grid on

title('$\dot{z1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure (3)

subplot(2,1,1)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3), 'b', 'LineWidth', 2);
    grid on
    title('$\Delta z1$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4), 'b', 'LineWidth', 2);
    grid on
        title('$\dot{\Delta z1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

end

```

Função graph2d

```
function graph2d(sys,ti,dt,tf,tipo,a1,a2,v)

%declarada matrix de tempo

t=ti:dt:tf;
i=0;
lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;

%plotados gráficos de acordo com cada entrada, 1=inicial nulo; 2=inicial
%deslocado ; 3=degrau; 4 senóide

if tipo==1
i=0;
x0=[0; 0; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
while i<=tf/dt;
if i>=0
u(1,i+1)=0;
u(2,i+1)=0;

end
i=i+1;
end
end
if tipo==2
i=0;
x0=[.1; 0; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
while i<=tf/dt;
if i>=0
u(1,i+1)=0;
u(2,i+1)=0;

end
i=i+1;
end
end
end

if tipo==3
i=0;
x0=[0; 0; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
while i<=tf/dt;
if i<50
u(1,i+1)=0;
u(2,i+1)=0;

end
if 50<=i<50+(a1+a2)/(v*dt)
u(1,i+1)=.1;
u(2,i+1)=0;

end

end
```

```

        if i>=50+(a1+a2)/(v*dt)
            u(1,i+1)=.1;
            u(2,i+1)=.1;

        end
        i=i+1;
    end
end

if tipo==4

while i<=tf/dt
    u(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
    u(2,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);
    i=i+1;
end

x0=[0;0;0;0;0;0;0;0;0]

end

[y1,t1]=lsim(sys,u,t,x0);

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

        ylabel('Aceleração
(m/s2)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure(2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on

title('$\{\theta\}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento
(rad)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on

title('$\dot{\theta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade
(rad/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,4))/dt, 'b', 'LineWidth', 2);
grid on

title('$\ddot{\theta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração
(rad/s2)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure (3)

        subplot(2,2,1)
        plot(t1,y1(:,5), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on

title('${z_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(2,2,3)
        plot(t1,y1(:,6), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on

title('$\dot{z_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);

```

```

xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,7), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on

title('${z2}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,8), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on

title('${\dot{z2}}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure(4)

subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on
title('${\Delta z1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on
title('${\dot{\Delta z1}}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on
title('${\Delta z2}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)), 'b', 'LineWidth', 2);
grid on

```

```
title('$\dot{\Delta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);  
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);  
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);  
  
end
```

Função gra3d

```
function gra3d(sys,ti,dt,tf,tipo,a1,a2,b1,b2,v)

%Declarada matriz de tempo

t=ti:dt:tf;
i=0;
lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;

%Plotados os gráficos de acordo com seu tipo, 1=inicialnulo;
%2=inicialdeslocado ; 3=degrau; 4=senoide; 7=senoide defasada

if tipo==1
x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
i=0;
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u(1,i+1)=0;
            u(2,i+1)=0;
            u(3,i+1)=0;
            u(4,i+1)=0;

            end
            i=i+1;
        end

    end

if tipo==2
x0=[.1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
i=0;
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u(1,i+1)=0;
            u(2,i+1)=0;
            u(3,i+1)=0;
            u(4,i+1)=0;

            end
            i=i+1;
        end

    end

if tipo==3
x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
i=0;
    while i<=tf/dt;
        if i<50
            u(1,i+1)=0;
            u(2,i+1)=0;
```

```

        u(3,i+1)=0;
        u(4,i+1)=0;

    end
    if 50<=i<50+(a1+a2)/(v*dt)
        u(1,i+1)=.1;
        u(2,i+1)=.1;
        u(3,i+1)=0;
        u(4,i+1)=0;

        end
        if i>=50+(a1+a2)/(v*dt)
            u(1,i+1)=.1;
            u(2,i+1)=.1;
            u(3,i+1)=.1;
            u(4,i+1)=.1;

        end
        i=i+1;
    end
end

if tipo==4

    x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];

    while i<=tf/dt
        u(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
        u(2,i+1)=a*sin(w*i*dt);
        u(3,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);
        u(4,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);

        i=i+1;
    end

end

if tipo==7

    i=0;
    lambda=15;
    w=v*2*pi/lambda;
    a=.1;
    x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; a*sin(w*i*dt); 0; a*sin((a1+a2)*pi/lambda+w*i*dt) ;
    0 ; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0 ;
    a*sin((a1+a2)*3/2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0];

    while i<=tf/dt
        u(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
        u(2,i+1)=a*sin((a1+a2)*pi/lambda+w*i*dt);
        u(3,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);
        u(4,i+1)=a*sin((a1+a2)*3/2*pi/lambda+w*i*dt);
        i=i+1;
    end
end
end

```

```

[y1,t1]=lsim(sys,u,t,x0);

%% z

figure (1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Theta - 2
figure (2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b','LineWidth',2);
%axis([-inf inf -0.1 0.1])
grid on

title('$\{\theta\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (rad)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4),'b','LineWidth',2);
%axis([-inf inf -0.1 0.1])

```

```

        grid on

title('$\dot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (rad/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,4))/dt,'b','LineWidth',2);
axis([-inf inf -0.1 0.1])
        grid on

title('$\ddot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Aceleração (rad/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Phi - 3
figure (3)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,5),'b','LineWidth',2);
        grid on

title('$\phi$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deslocamento (rad)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,6),'b','LineWidth',2);
        grid on

title('$\dot{\phi}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (rad/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,6))/dt,'b','LineWidth',2);
        grid on

title('$\ddot{\phi}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Aceleração (rad/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

%% z1 e z2 - 4

figure (4)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,7), 'b', 'LineWidth',2);
grid on

title('${z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,8), 'b', 'LineWidth',2);
grid on

title('${\dot{z1}}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,9), 'b', 'LineWidth',2);
grid on

title('${z2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,10), 'b', 'LineWidth',2);
grid on

title('${\dot{z2}}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% z3 e z4 - 5

figure (5)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,11), 'b', 'LineWidth',2);
grid on

title('${z3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,12),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\dot{z_3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,13),'b','LineWidth',2);
grid on

title('${z_4}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,14),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\dot{z_4}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Delta z1 e Delta z2 - 6

figure (6)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,1)-
y1(:,7)+a1*sin(y1(:,5))+b1*sin(y1(:,3)),'b','LineWidth',2);
grid on
title('${\Delta z_1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,2)-
y1(:,8)+a1*sin(y1(:,6))+b1*sin(y1(:,4)),'b','LineWidth',2);
grid on
title('$\dot{\Delta z_1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

subplot(2,2,2)
plot(t1,y1(:,1)-y1(:,9)+a1*sin(y1(:,5))-
b2*sin(y1(:,3)), 'b', 'LineWidth',2);
grid on
title('$\Delta$ z2$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,2)-y1(:,10)+a1*sin(y1(:,6))-
b2*sin(y1(:,4)), 'b', 'LineWidth',2);
grid on
title('$\dot{\Delta}$ z2$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);

%% Delta z3 e Delta z4 - 7

figure (7)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,1)-y1(:,11)-
a2*sin(y1(:,5))+b1*sin(y1(:,3)), 'b', 'LineWidth',2);
grid on
title('$\Delta$ z3$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,2)-y1(:,12)-
a2*sin(y1(:,6))+b1*sin(y1(:,4)), 'b', 'LineWidth',2);
grid on
title('$\dot{\Delta}$ z3$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);

subplot(2,2,2)
plot(t1,y1(:,1)-y1(:,13)-a2*sin(y1(:,5))-
b2*sin(y1(:,3)), 'b', 'LineWidth',2);
grid on
title('$\Delta$ z4$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);

```

```

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,2)-y1(:,14)-a2*sin(y1(:,6))-
b2*sin(y1(:,4)),'b','LineWidth',2);
grid on
title('$\dot{\Delta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Pos e Vel Mot - 8

figure(8)

subplot(2,1,1)

plot(t1,0.3+y1(:,1)+0.5*sin(y1(:,3))+0.5*sin(y1(:,5)),'b','LineWidth',2);
grid on

title('${m}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,1,2)

plot(t1,y1(:,2)+0.5*sin(y1(:,4))+0.5*sin(y1(:,6)),'b','LineWidth',2);
grid on

title('$\dot{m}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s^2)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Aceleraçao vet Mot - 9

t3=ti:dt:tf-dt;
ami=0.3.*diff(y1(:,6))/dt-
0.5.*(diff(y1(:,5))/dt).*((diff(y1(:,5))/dt)+(diff(y1(:,3))/dt));
amj=-
0.3.*diff(y1(:,4))/dt+0.5.*(diff(y1(:,3))/dt).*((diff(y1(:,5))/dt)+(diff(
y1(:,3))/dt));
amk=diff(y1(:,2))/dt-0.5.*diff(y1(:,4))/dt-
0.5.*diff(y1(:,6))/dt-0.3.*(diff(y1(:,3))/dt).*(diff(y1(:,3))/dt)-
0.3.*(diff(y1(:,5))/dt).*(diff(y1(:,5))/dt);
am=sqrt(ami.*ami+amj.*amj+amk.*amk);

ax1=[t3' ami];
ay1=[t3' amj];

```

```

az1=[t3' amk];

global ax1
global ay1
global az1

figure(9)

subplot(3,1,1)
plot(t3,ami,'b','LineWidth',2);
grid on
title('$\ddot{am}$
i','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)

plot(t3,amj,'b','LineWidth',2);
%axis([-inf inf -0.1 0.1])
grid on
title('$\ddot{am}$
j','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)

plot(t3,amk,'b','LineWidth',2);
grid on
title('$\ddot{am}$
k','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Acel Mot - 10

figure (10)

plot(t3,am,'b','LineWidth',2);
grid on
title('$\ddot{am}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',
15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

end

```

Função graph1dcontr

```
function graph1d(sys,sys1,ti,dt,tf,tipo)

%Declarada matriz de tempo

t=ti:dt:tf;

%plotados gráficos e suas respectivas entradas de acordo com o seu "tipo"

if tipo==1
i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u1(1,i+1)=0;
            % u1(2,i+1)=0;
            u2(1,i+1)=0;
        end
        i=i+1;
    end
    [y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
    [y2,t2]=lsim(sys1,u2,t,x0);

    figure(1)
    subplot(3,2,1)

    plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
        grid on
            title('x1','fontweight','bold','fontsize',12);
            xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
            ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(3,2,2)

    plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
        grid on
            title('x1 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
            xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
            ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    subplot(3,2,3)

    plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
        grid on
            title('x2','fontweight','bold','fontsize',11);
            xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
            ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
    subplot(3,2,4)

    plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
        grid on
            title('x2 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
            xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
            ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
```

```

subplot(3,2,5)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
title('\Delta z','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

subplot(3,2,6)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
title('\Delta z ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(7)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',1);
title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

end
if tipo==2
i=0;
x0=[0.1; 0; 0; 0];
while i<=tf/dt;
if i>=0
u1(1,i+1)=0;
% u1(2,i+1)=0;
u2(1,i+1)=0;
end
i=i+1;
end
[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u2,t,x0);

figure(1)
subplot(3,2,1)

plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x1','fontweight','bold','fontsize',12);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,2,2)

plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x1 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);

```

```

        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
subplot(3,2,3)

plot(t1,y1(:,3), 'b', t2,y2(:,3), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
title('x2', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
    xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
    ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
subplot(3,2,4)

plot(t1,y1(:,4), 'b', t2,y2(:,4), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
title('x2 ponto', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
    xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
    ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);

    subplot(3,2,5)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,3), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
title('\Delta z', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
    xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
    ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);

    subplot(3,2,6)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,4), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
title('\Delta z ponto', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
    xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
    ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);

    figure(7)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt, 'b', t3,diff(y2(:,2))/dt, 'r', 'LineWidth', 1);
title('$\ddot{z}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
    xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
    ylabel('Aceleração (m/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

end

if tipo==3
    i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if 0<i<=50
            u1(1,i+1)=0;
            % u1(2,i+1)=0;
            u2(1,i+1)=0;
        end
        if i>=50
            u1(1,i+1)=.1;
            %u1(2,i+1)=.1;
        end
    end
end

```

```

        u2(1,i+1)=.1;
    end
    i=i+1;
end
[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u2,t,x0);

figure(1)
subplot(3,2,1)

plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x1','fontweight','bold','fontsize',12);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,2,2)

plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x1 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(3,2,3)

plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x2','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(3,2,4)

plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x2 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

subplot(3,2,5)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
title('\Delta z','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

subplot(3,2,6)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
title('\Delta z ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(7)

```

```

t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',1);
title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

end

if tipo==4

i=0;
v=10;
lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;

while i<=tf/dt
    u1(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
    % u1(2,i+1)=a*w*cos(w*i*dt);
    u2(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
    i=i+1;
end

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t);
[y2,t2]=lsim(sys1,u2,t);

i=0;

figure(1)
subplot(3,2,1)

plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('x1','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,2,2)

plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('x1 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(3,2,3)

plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('x2','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(3,2,4)

```

```

plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x2 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

    subplot(3,2,5)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,3),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

    subplot(3,2,6)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

    figure(7)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',1);
title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

end
end

```

Função graph1dobs

```
function graph1dobs(sys,sys1,ti,dt,tf,v,perfil,Gd_w0,tipos)

%matriz de tempo

t=ti:dt:tf;

%simulações e graficos de acordo com cada simulação

if tipos==1
i=0;
x0=[0; 0; 0; 0];
x01=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];

while i<=tf/dt;
    if i>=0
        u1(1,i+1)=0;
        u2(1,i+1)=0;
    end
    i=i+1;
end
[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u2,t,x01);

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
```

```

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure (2)

subplot(2,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure (3)

subplot(2,1,1)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('${\Delta z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('${\dot{\Delta z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

end
if tipo==2
i=0;

```

```

x0=[0.1; 0; 0; 0];
x01=[0.1; 0; 0; 0; 0.015; 0; 0; 0];
while i<=tf/dt;
    if i>=0
        u1(1,i+1)=0;
        u2(1,i+1)=0;

        end
        i=i+1;
    end
[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u2,t,x01);

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure(2)

subplot(2,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z_1\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

```

```

        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,4), 'b', t2,y2(:,4), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{z}_1$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure (3)

subplot(2,1,1)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,3), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
    title('$\Delta z_1$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,4), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
    title('$\dot{\Delta z}_1$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

end

if tipo==3
    i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0];
    x01=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if 0<i<=50
            u1(1,i+1)=0;
            u2(1,i+1)=0;

            end
            if i>=50
                u1(1,i+1)=.1;
                u2(1,i+1)=0.1;

            end
            i=i+1;

```

```

end
[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u2,t,x01);

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure (2)

subplot(2,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z_1\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

```

```

title('$\dot{z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure (3)

subplot(2,1,1)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\Delta z1$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\dot{\Delta z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

end

if tipo==4

i=0;
v=20;
lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;
x0=[0; a*w; 0; a*w];
x01=[0; a*w; 0; a*w; 0; 0; 0; 0];
while i<=tf/dt
    u1(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
    u2(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
    i=i+1;
end

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u2,t,x01);

i=0;

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);

```

```

        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(3,1,3)
    t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure (2)

    subplot(2,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z1\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure (3)

```

```

        subplot(2,1,1)
        t3=ti:dt:tf-dt;
        plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,3),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\Delta$'z1}','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,1,2)
plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\dot{\Delta}$'z1}','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

end

if tipo==5

% spatial frequency (n0) cycles per meter
Omega0 = 0.1;
% psd ISO (used for formula 8)
Gd_0 =Gd_w0;
% waveviness
w = 2;
% road length
L = v*tf;

%delta n
N = 1000;
Omega_L = 0.004;
Omega_U = 4;

delta_n = 1/L; % delta_n = (Omega_U - Omega_L)/(N-1);

% spatial frequency band
Omega = Omega_L:delta_n:Omega_U;

%PSD of road
Gd = Gd_0.*(Omega./Omega0).^(-w);

% calculate amplitude using formula(8) in the article
%Amp = sqrt(2*Gd*delta_n);

%calculate amplitude using simplified formula(9) in the article
k = perfil;
Amp = sqrt(delta_n) * (2^k) * (10^-3) * (Omega0./Omega);

%random phases
Psi = 2*pi*rand(size(Omega));

```

```

% x abicsa from 0 to L
x = 0:dt*v:v*tf;
% road sinal
h= zeros(size(x));

for i=1:length(x)
    h(i) = sum( Amp.*cos(Omega*x(i) + Psi) );
end
figure(50)
plot(x, h*1000, 'r', 'LineWidth', 2 );
xlabel('Distância (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Elevação (mm)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

grid on
i=0;

while i<=tf/dt
    u1(1,i+1)=h(i+1);

    i=i+1;
    global u1
end

x0=[(h(1)); 0; h(1) ; 0 ];
x01=[(h(1)); 0; h(1) ; 0 ;0; 0; 0; 0];

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x01);

i=0;

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1), 'b', t2,y2(:,1), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\{z\}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2), 'b', t2,y2(:,2), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{\{z\}}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

```

```

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
        plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

    title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

    figure (2)

    subplot(2,1,1)
    plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

    title('${z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(2,1,2)
    plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

    title('$\dot{z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    figure (3)

    subplot(2,1,1)
    t3=ti:dt:tf-dt;
    plot(t1,y1(:,1)-y1(:,3),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,3),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')
    title('${\Delta z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(2,1,2)
    plot(t1,y1(:,2)-y1(:,4),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')
    title('${\dot{\Delta z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

```

```

        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

    end

    amz1=[t3' diff(y1(:,2))/dt];
    amz2=[t3' diff(y2(:,2))/dt];
    global amz1
    global amz2

end

```

Função graph2dcontr

```
function graph2dcontr(sys,sys1,ti,dt,tf,a1,a2,v,tipo)

%matriz de tempo

t=ti:dt:tf;

%simulação, entrada e graficos de acordo com cada tipo selecionado

if tipo==1
i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;
        end
        i=i+1;
    end
    [y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
    [y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x0);

    figure(1)
    subplot(2,2,1)

    plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
        grid on
            title('x','fontweight','bold','fontsize',12);
            xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
            ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(2,2,2)

    plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
        grid on
            title('x ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
            xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
            ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    subplot(2,2,3)

    plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
        grid on
            title('\theta','fontweight','bold','fontsize',11);
            xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
            ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
    subplot(2,2,4)

    plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
        grid on
            title('\theta ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
            xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
            ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
```

```

        figure(2)
subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,5),'b',t2,y2(:,5),'r','LineWidth',2);
grid on
    title('x1','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,7),'b',t2,y2(:,7),'r','LineWidth',2);
grid on
    title('x1 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,6),'b',t2,y2(:,6),'r','LineWidth',2);
grid on
    title('x2','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,8),'b',t2,y2(:,8),'r','LineWidth',2);
grid on
    title('x2 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(3)

subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-
y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
grid on
    title('\Delta z1','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-
y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
grid on
    title('\Delta z1 ponto','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
grid on

```

```

title('\Delta z2','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z2 ponto','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    figure(7)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',1);
title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',1
5);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração
(m/s2)','fontweight','bold','fontsize',12);

end
if tipo==2
i=0;
    x0=[.1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;

            end
            i=i+1;
        end
[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x0);

figure(1)
subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('x','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\theta','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,3)

```

```

plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\theta ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(2)
subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,5),'b',t2,y2(:,5),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('x1','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,7),'b',t2,y2(:,7),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x1 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,6),'b',t2,y2(:,6),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x2','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,8),'b',t2,y2(:,8),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x2 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(3)

subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-
y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('\Delta z1','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-
y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z1 ponto','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z2','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z2 ponto','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    figure(7)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',1);
title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',1
5);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

end

if tipo==3
    i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i<50
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;

            end

            if 50<=i<50+(a1+a2)/(v*dt)
                u1(1,i+1)=.1;
                u1(2,i+1)=0;

            end
end

```

```

    if i>=50+(a1+a2)/(v*dt)
        u1(1,i+1)=.1;
        u1(2,i+1)=.1;
    end

    i=i+1;

end

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x0);

figure(1)
subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x','fontweight','bold','fontsize',12);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
grid on
title('\theta','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
grid on
title('\theta ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(2)
subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,5),'b',t2,y2(:,5),'r','LineWidth',2);
grid on
title('x1','fontweight','bold','fontsize',12);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

```

```

plot(t1,y1(:,7),'b',t2,y2(:,7),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x1 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,6),'b',t2,y2(:,6),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x2','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,8),'b',t2,y2(:,8),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x2 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(3)

subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-
y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('\Delta z1','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-
y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z1 ponto','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z2','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z2 ponto','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        figure(7)
        t3=ti:dt:tf-dt;
        plot(t3, diff(y1(:,2))/dt, 'b', t3, diff(y2(:,2))/dt, 'r', 'LineWidth', 1);
        title('$\ddot{z}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração (m/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

    end

    if tipo==4

        i=0;
        v=10;
        lambda=15;
        w=v*2*pi/lambda;
        a=.1;
        x0=[0; a*w; 0; a*w];
        x01=[0; a*w; 0; a*w; 0; 0; 0; 0];
        while i<=tf/dt
            u1(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
            % u1(2,i+1)=a*w*cos(w*i*dt);
            u2(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
            i=i+1;
        end

        [y1,t1]=lsim(sys,u1,t);
        [y2,t2]=lsim(sys1,u2,t);

        i=0;

        figure(1)
        subplot(2,2,1)

        plot(t1,y1(:,1), 'b', t2,y2(:,1), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        title('x1', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(2,2,2)

        plot(t1,y1(:,3), 'b', t2,y2(:,3), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        title('x1 ponto', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 11);
        subplot(2,2,3)

        plot(t1,y1(:,2), 'b', t2,y2(:,2), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on

```

```

title('x2','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x2 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(2)
subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,5),'b',t2,y2(:,5),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('x1','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,7),'b',t2,y2(:,7),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x1 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,6),'b',t2,y2(:,6),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x2','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',11);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,8),'b',t2,y2(:,8),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('x2 ponto','fontweight','bold','fontsize',11);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',11);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',11);

figure(3)

subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-
y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
    grid on
    title('\Delta z1','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

```

```

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-
y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z1 ponto','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z2','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
    grid on
title('\Delta z2 ponto','fontweight','bold','fontsize',12);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    figure(7)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',1);
title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',1
5);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

end
end

```

Função graph2dobs

```
function graph2dobs(sys,sys1,ti,dt,tf,a1,a2,v,perfil,Gd_w0,tipo)

%Matriz de tempo

t=ti:dt:tf;

%feita simulação, estipulada entradas e plotado os graficos de acordo com
%cada tipo de entrada

if tipo==1
i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    x01=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;
        end
        i=i+1;
    end
    [y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
    [y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x01);

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${\dot{z}}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(3,1,3)
    t3=ti:dt:tf-dt;
    plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${\ddot{z}}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
```

```

        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração
(m/s2)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure(2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3), 'b', t2,y2(:,3), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\{\theta\}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento
(rad)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4), 'b', t2,y2(:,4), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{\theta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade
(rad/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,4))/dt, 'b', t3,diff(y2(:,4))/dt, 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\ddot{\theta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração
(rad/s2)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure (3)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,5), 'b', t2,y2(:,5), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$z_1$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)

```

```

        plot(t1,y1(:,6),'b',t2,y2(:,6),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,2)

        plot(t1,y1(:,7),'b',t2,y2(:,7),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${z2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,4)
        plot(t1,y1(:,8),'b',t2,y2(:,8),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        figure(4)

        subplot(2,2,1)

        plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-
        y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('${\Delta z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,3)

        plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-
        y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('${\Delta z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        subplot(2,2,2)

```

```

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\Delta z_2$', 'interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\dot{\Delta z_2}$', 'interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

end
if tipo==2
i=0;
x0=[.1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
x01=[.1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; .01; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;

            end
            i=i+1;
        end
[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x01);

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$z_1$', 'interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

```

```

title('$\dot{z}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt, 'b', t3,diff(y2(:,2))/dt, 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\ddot{z}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Aceleração (m/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure(2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3), 'b', t2,y2(:,3), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\{\theta\}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deslocamento (rad)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4), 'b', t2,y2(:,4), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{\theta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (rad/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,4))/dt, 'b', t3,diff(y2(:,4))/dt, 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\ddot{\theta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Aceleração (rad/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

```

figure (3)

```
subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,5), 'b', t2,y2(:,5), 'r', 'LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${z1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,6), 'b', t2,y2(:,6), 'r', 'LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${\dot{z1}}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,7), 'b', t2,y2(:,7), 'r', 'LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${z2}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,8), 'b', t2,y2(:,8), 'r', 'LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${\dot{z2}}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',12);
```

figure(4)

```
subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-
y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('${\Delta z1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',15);
```

```

        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-
y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\dot{\Delta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
    xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
    ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\Delta$z2', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
    xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
    ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\dot{\Delta}$z2', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
    xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
    ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

end

if tipo==3
    i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    x01=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i<50
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;

            end

            if 50<=i<50+(a1+a2)/(v*dt)
                u1(1,i+1)=.1;
                u1(2,i+1)=0;

            end

end

```

```

    if i>=50+(a1+a2)/(v*dt)
        u1(1,i+1)=.1;
        u1(2,i+1)=.1;
    end

    i=i+1;

end

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x01);

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure(2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{\theta\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

```

```

        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento
(rad)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4), 'b', t2,y2(:,4), 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{\theta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade
(rad/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,4))/dt, 'b', t3,diff(y2(:,4))/dt, 'r', 'LineWidth', 2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\ddot{\theta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração
(rad/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

```

figure (3)

```

        subplot(2,2,1)
        plot(t1,y1(:,5), 'b', t2,y2(:,5), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${z_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(2,2,3)
        plot(t1,y1(:,6), 'b', t2,y2(:,6), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{z_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(2,2,2)

        plot(t1,y1(:,7), 'b', t2,y2(:,7), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

```

```

title('$z_2$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,8), 'b', t2,y2(:,8), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{z}_2$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure(4)

subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-
y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\Delta z_1$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-
y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\dot{\Delta z_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\Delta z_2$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on

```

```

        legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\dot{\Delta}$', 'interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

end

if tipo==4

i=0;
v=10;
lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;
x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda); 0];
x01=[0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda); 0 ; 0 ; 0 ; 0 ;
; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
while i<=tf/dt
    u1(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
    u1(2,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);;
    i=i+1;
end

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x01);

i=0;

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${z}$', 'interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z}$', 'interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)
t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);

```

```

        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure(2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{\theta\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deslocamento
(rad)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade
(rad/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,4))/dt,'b',t3,diff(y2(:,4))/dt,'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Aceleração
(rad/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

figure (3)

        subplot(2,2,1)
        plot(t1,y1(:,5),'b',t2,y2(:,5),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$z_1$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

```

```

xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,6), 'b', t2,y2(:,6), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{z_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);

xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,7), 'b', t2,y2(:,7), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${z_2}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,8), 'b', t2,y2(:,8), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{z_2}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);

xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure(4)

subplot(2,2,1)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-
y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('${\Delta z_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-
y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

```

```

title('$\dot{\Delta}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\Delta$ z1', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\dot{\Delta}$ z2', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

end

if tipo==5

% spatial frequency (n0) cycles per meter
Omega0 = 0.1;
% psd ISO (used for formula 8)
Gd_0 = Gd_w0;
% waveviness
w = 2;
% road length
L = v*tf+a1+a2;

%delta n
N = 1000;
Omega_L = 0.004;
Omega_U = 4;

delta_n = 1/L; % delta_n = (Omega_U - Omega_L)/(N-1);

% spatial frequency band
Omega = Omega_L:delta_n:Omega_U;

%PSD of road
Gd = Gd_0.*(Omega./Omega0).^(-w);

% calculate amplitude using formula(8) in the article
%Amp = sqrt(2*Gd*delta_n);

```

```

%calculate amplitude using simplified formula(9) in the article
k = perfil;
Amp = sqrt(delta_n) * (2^k) * (10^-3) * (Omega0./Omega);

%random phases
Psi = 2*pi*rand(size(Omega));

% x abicsa from 0 to L
x = 0:dt*v:v*tf+a1+a2;
% road sinal
h= zeros(size(x));

for i=1:length(x)
    h(i) = sum( Amp.*cos(Omega*x(i) + Psi) );
end
figure(50)
plot(x, h*1000,'r','LineWidth',2 );
xlabel('Distância (m)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Elevação (mm)','fontweight','bold','fontsize',12);

grid on
i=0;

while i<=tf/dt
    u1(1,i+1)=h(i+1+round((a1+a2)/(v*dt)))/2;
    u1(2,i+1)=h(i+1);

    i=i+1;
    global u1
end

x0=[ (h(1)+h(1+round((a1+a2)/(v*dt))))/2; 0; 0; 0;
h(1+round((a1+a2)/(v*dt))); 0; h(1) ; 0 ;];
x01=[ (h(1)+h(1+round((a1+a2)/(v*dt))))/2; 0; 0; 0;
h(1+round((a1+a2)/(v*dt))); 0; h(1) ; 0 ; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x01);

i=0;

figure(1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)

```

```

plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(3,1,3)
    t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

    figure(2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{\theta\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (rad)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (rad/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(3,1,3)
    t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,4))/dt,'b',t3,diff(y2(:,4))/dt,'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsi
ze',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

        ylabel('Aceleração
(rad/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure (3)

        subplot(2,2,1)
        plot(t1,y1(:,5), 'b', t2,y2(:,5), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${z1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(2,2,3)
        plot(t1,y1(:,6), 'b', t2,y2(:,6), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${\dot{z1}}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(2,2,2)

        plot(t1,y1(:,7), 'b', t2,y2(:,7), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${z2}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(2,2,4)
        plot(t1,y1(:,8), 'b', t2,y2(:,8), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${\dot{z2}}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

figure(4)

        subplot(2,2,1)

        plot(t1,y1(:,1)-y1(:,5)+a1*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-
y2(:,5)+a1*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

```

```

        title('${\Delta}
z1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,6)+a1*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-
y2(:,6)+a1*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('${\dot{\Delta}
z1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,1)-y1(:,7)-a2*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,7)-
a2*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('${\Delta}
z2}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
subplot(2,2,4)

plot(t1,y1(:,2)-y1(:,8)-a2*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,8)-
a2*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('${\dot{\Delta}
z2}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

end

amz1=[t3' diff(y1(:,2))/dt];
amz2=[t3' diff(y2(:,2))/dt];
global amz1
global amz2

end

```

Função graph3dcontr

```
function graph3dcontr(sys,sys1,ti,dt,tf,a1,a2,b1,b2,v,tipo)

%Matriz de tempo

t=ti:dt:tf;

%Simulações, entradas e graficos de acordo com cada tipo de entrada

if tipo==1
i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;
            u1(3,i+1)=0;
            u1(4,i+1)=0;
        end
        i=i+1;
    end

end

if tipo==2
i=0;
    x0=[.1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i>=0
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;
            u1(3,i+1)=0;
            u1(4,i+1)=0;
        end
        i=i+1;
    end

end

if tipo==3
i=0;
    x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
    while i<=tf/dt;
        if i<50
            u1(1,i+1)=0;
            u1(2,i+1)=0;
            u1(3,i+1)=0;
            u1(4,i+1)=0;
        end

        if 50<=i<50+(a1+a2)/(v*dt)
            u1(1,i+1)=.1;
        end
    end
end
```

```

        u1(2,i+1)=.1;
        u1(3,i+1)=0;
        u1(4,i+1)=0;

    end

    if i>=50+(a1+a2)/(v*dt)
        u1(1,i+1)=.1;
        u1(2,i+1)=.1;
        u1(3,i+1)=.1;
        u1(4,i+1)=.1;
    end

    i=i+1;

end

end

if tipo==4

i=0;
lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;
x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0
; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0];
    while i<=tf/dt
        u1(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
        u1(2,i+1)=a*sin(w*i*dt);
        u1(3,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);
        u1(4,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);
        i=i+1;
    end

end

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x0);

%% x 1

figure (1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{x\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{x}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(3,1,3)
    t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{x}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

    %% Theta - 2
    figure (2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{\theta\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(3,1,3)
    t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,4))/dt,'b',t3,diff(y2(:,4))/dt,'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

        ylabel('Aceleração
(m/s2)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        %% Phi - 3
        figure (3)

        subplot(3,1,1)
        plot(t1,y1(:,5), 'b', t2,y2(:,5), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

        title('$\{\phi\}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15)
        ;
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(3,1,2)
        plot(t1,y1(:,6), 'b', t2,y2(:,6), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

        title('$\dot{\phi}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',
        ,15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
        plot(t3,diff(y1(:,6))/dt, 'b', t3,diff(y2(:,6))/dt, 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

        title('$\ddot{\phi}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',
        ,15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração
(m/s2)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        %% x1 e x2 - 4

        figure (4)

        subplot(2,2,1)
        plot(t1,y1(:,7), 'b', t2,y2(:,7), 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

        title('${x_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(2,2,3)

```

```

plot(t1,y1(:,8),'b',t2,y2(:,8),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{x1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,9),'b',t2,y2(:,9),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${x2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,10),'b',t2,y2(:,10),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{x2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% x3 e x4 - 5

figure (5)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,11),'b',t2,y2(:,11),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${x3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,12),'b',t2,y2(:,12),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{x3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);

xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,13),'b',t2,y2(:,13),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${x4}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,14),'b',t2,y2(:,14),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${\dot{x4}}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% z1 e z2 - 6

figure (6)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,1)-
y1(:,7)+a1*sin(y1(:,5))+b1*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-
y2(:,7)+a1*sin(y2(:,5))+b1*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,2)-
y1(:,8)+a1*sin(y1(:,6))+b1*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-
y2(:,8)+a1*sin(y2(:,6))+b1*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${\dot{z1}}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)
plot(t1,y1(:,1)-y1(:,9)+a1*sin(y1(:,5))-
b2*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,9)+a1*sin(y2(:,5))-
b2*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);

```

```

        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,4)
        plot(t1,y1(:,2)-y1(:,10)+a1*sin(y1(:,6))-
b2*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,10)+a1*sin(y2(:,6))-
b2*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% z3 e z4 - 7

figure (7)

        subplot(2,2,1)
        plot(t1,y1(:,1)-y1(:,11)-
a2*sin(y1(:,5))+b1*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,11)-
a2*sin(y2(:,5))+b1*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,3)
        plot(t1,y1(:,2)-y1(:,12)-
a2*sin(y1(:,6))+b1*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,12)-
a2*sin(y2(:,6))+b1*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,2)
        plot(t1,y1(:,1)-y1(:,13)-a2*sin(y1(:,5))-
b2*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,13)-a2*sin(y2(:,5))-
b2*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth',2);
        grid on

```

```

        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{z4}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,4)
        plot(t1,y1(:,2)-y1(:,14)-a2*sin(y1(:,6))-
b2*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,14)-a2*sin(y2(:,6))-
b2*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{\{z4}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',1
5);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Pos e Vel Mot - 8

figure(8)

subplot(2,1,1)

plot(t1,0.3+y1(:,1)+0.5*sin(y1(:,3))+0.5*sin(y1(:,5)),'b',t2,0.3+y2(:,1)+
0.5*sin(y2(:,3))+0.5*sin(y2(:,5)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{m}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,1,2)

plot(t1,y1(:,2)+0.5*sin(y1(:,4))+0.5*sin(y1(:,6)),'b',t2,y2(:,2)+0.5*sin(
y2(:,4))+0.5*sin(y2(:,6)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{\{m}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15
);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade
(m/s^2)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Aceleracao vet Mot - 9

t3=ti:dt:tf-dt;
amil=0.3.*diff(y1(:,6))/dt-
0.5.*(diff(y1(:,5))/dt).*((diff(y1(:,5))/dt)+(diff(y1(:,3))/dt));

```

```

        amj1=-
0.3.*diff(y1(:,4))/dt+0.5.*(diff(y1(:,3))/dt).*((diff(y1(:,5))/dt)+(diff(
y1(:,3))/dt));
        amk1=diff(y1(:,2))/dt-0.5.*diff(y1(:,4))/dt-
0.5.*diff(y1(:,6))/dt-0.3.*(diff(y1(:,3))/dt).*(diff(y1(:,3))/dt)-
0.3.*(diff(y1(:,5))/dt).*(diff(y1(:,5))/dt);
        am1=sqrt(ami1.*ami1+amj1.*amj1+amk1.*amk1);

        ami2=0.3.*diff(y2(:,6))/dt-
0.5.*(diff(y2(:,5))/dt).*((diff(y2(:,5))/dt)+(diff(y2(:,3))/dt));
        amj2=-
0.3.*diff(y2(:,4))/dt+0.5.*(diff(y2(:,3))/dt).*((diff(y2(:,5))/dt)+(diff(
y2(:,3))/dt));
        amk2=diff(y2(:,2))/dt-0.5.*diff(y2(:,4))/dt-
0.5.*diff(y2(:,6))/dt-0.3.*(diff(y2(:,3))/dt).*(diff(y2(:,3))/dt)-
0.3.*(diff(y2(:,5))/dt).*(diff(y2(:,5))/dt);
        am2=sqrt(ami2.*ami2+amj2.*amj2+amk2.*amk2);

figure(9)

subplot(3,1,1)
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
plot(t3,ami1,'b',t3,ami2,'r','LineWidth',2);
title('$\ddot{am}$
i','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)

plot(t3,amj1,'b',t3,amj2,'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\ddot{am}$
j','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,3)

plot(t3,amk1,'b',t3,amk2,'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\ddot{am}$
k','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração
(m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```
%% Acel Mot - 10
```

```

figure (10)

plot(t3,am1,'b',t3,am2,'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\ddot{am}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',
15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Aceleração
(m/s2)','fontweight','bold','fontsize',12);
end

```

[illegible]

```

        u1(3,i+1)=0;
        u1(4,i+1)=0;

    end

    if 50<=i<50+(a1+a2)/(v*dt)
        u1(1,i+1)=.1;
        u1(2,i+1)=.1;
        u1(3,i+1)=0;
        u1(4,i+1)=0;

    end

    if i>=50+(a1+a2)/(v*dt)
        u1(1,i+1)=.1;
        u1(2,i+1)=.1;
        u1(3,i+1)=.1;
        u1(4,i+1)=.1;
    end

    i=i+1;

end

end

if tipo==4

i=0;
lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;
x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0
; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0];
x01=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ;
0 ; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
    while i<=tf/dt
        u1(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
        u1(2,i+1)=a*sin(w*i*dt);
        u1(3,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);
        u1(4,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);
        i=i+1;
    end
end

if tipo==5

% spatial frequency (n0) cycles per meter
Omega0 = 0.1;
% psd ISO (used for formula 8)
Gd_0 = Gd_w0;
% waveviness
w = 2;
% road length

```

```

L = v*tf+a1+a2;

%delta n
N = 1000;
Omega_L = 0.004;
Omega_U = 4;

delta_n = 1/L; % delta_n = (Omega_U - Omega_L)/(N-1);

% spatial frequency band
Omega = Omega_L:delta_n:Omega_U;

%PSD of road
Gd = Gd_0.*(Omega./Omega0).^(-w);

% calculate amplitude using formula(8) in the article
%Amp = sqrt(2*Gd*delta_n);

%calculate amplitude using simplified formula(9) in the article
k = perfil;
Amp = sqrt(delta_n) * (2^k) * (10^-3) * (Omega0./Omega);

%random phases
Psi = 2*pi*rand(size(Omega));

% x abicsa from 0 to L
x = 0:dt*v:v*tf+a1+a2;
% road sinal
h= zeros(size(x));

for i=1:length(x)
    h(i) = sum( Amp.*cos(Omega*x(i) + Psi) );
end
figure(50)
plot(x, h*1000, 'r', 'LineWidth', 2 );
xlabel('Distância (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Elevação (mm)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

grid on
i=0;

while i<=tf/dt
    u1(1,i+1)=h(i+1+round((a1+a2)/(v*dt)));
    u1(2,i+1)=h(i+1+round((a1+a2)/(v*dt)));
    u1(3,i+1)=h(i+1);
    u1(4,i+1)=h(i+1);
    i=i+1;
    global u1
end

x0=[ (h(1)+h(1+round((a1+a2)/(v*dt))))/2; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
h(1+round((a1+a2)/(v*dt))); 0; h(1+round((a1+a2)/(v*dt))); 0 ; h(1) ; 0
; h(1) ; 0];

```

```

        x01=[ (h(1)+h(1+round((a1+a2)/(v*dt))))/2; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
h(1+round((a1+a2)/(v*dt))); 0; h(1+round((a1+a2)/(v*dt))) ; 0 ; h(1) ; 0
; h(1) ; 0;0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];

end

if tipo==6

% spatial frequency (n0) cycles per meter
Omega0 = 0.1;
% psd ISO (used for formula 8)
Gd_0 = Gd_w0;
% waveviness
w = 2;
% road length
L = v*tf+(a1+a2)*3/2;

%delta n
N = 1000;
Omega_L = 0.004;
Omega_U = 4;

delta_n = 1/L; % delta_n = (Omega_U - Omega_L)/(N-1);

% spatial frequency band
Omega = Omega_L:delta_n:Omega_U;

%PSD of road
Gd = Gd_0.*(Omega./Omega0).^(-w);

% calculate amplitude using formula(8) in the article
%Amp = sqrt(2*Gd*delta_n);

%calculate amplitude using simplified formula(9) in the article
k = perfil;
Amp = sqrt(delta_n) * (2^k) * (10^-3) * (Omega0./Omega);

%random phases
Psi = 2*pi*rand(size(Omega));

% x abicsa from 0 to L
x = 0:dt*v:v*tf+(a1+a2)*3/2;
% road sinal
h= zeros(size(x));

for i=1:length(x)
    h(i) = sum( Amp.*cos(Omega*x(i) + Psi) );
end
figure(50)
plot(x, h*1000,'r','LineWidth',2 );
xlabel('Distância (m)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Elevação (mm)','fontweight','bold','fontsize',12);
grid on

```

```

i=0;

while i<=tf/dt
    u1(1,i+1)=h(i+1+round((a1+a2)/(v*dt)));
    u1(2,i+1)=h(i+1+round((a1+a2)*3/(2*(v*dt))));
    u1(3,i+1)=h(i+1);
    u1(4,i+1)=h(i+1+round((a1+a2)/(2*v*dt)));
    i=i+1;
    global u1
end

x0=[(h(1)+h(1+round((a1+a2)/(v*dt))))/2; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
h(1+round((a1+a2)/(v*dt))); 0; h(1+round((a1+a2)/(v*dt))) ; 0 ; h(1) ; 0
; h(1) ; 0];
x01=[(h(1)+h(1+round((a1+a2)/(v*dt))))/2; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
h(1+round((a1+a2)/(v*dt))); 0; h(1+round((a1+a2)/(v*dt))) ; 0 ; h(1) ; 0
; h(1) ; 0;0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];

end

if tipo==7

i=0;
lambda=15;
w=v*2*pi/lambda;
a=.1;
x0=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0
; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0];
x01=[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0 ; 0 ; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ;
0 ; a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt) ; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0];
    while i<=tf/dt
        u1(1,i+1)=a*sin(w*i*dt);
        u1(2,i+1)=a*sin((a1+a2)*pi/lambda+w*i*dt);
        u1(3,i+1)=a*sin((a1+a2)*2*pi/lambda+w*i*dt);
        u1(4,i+1)=a*sin((a1+a2)*3/2*pi/lambda+w*i*dt);
        i=i+1;
    end
end

[y1,t1]=lsim(sys,u1,t,x0);
[y2,t2]=lsim(sys1,u1,t,x01);

%% x 1

figure (1)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,1),'b',t2,y2(:,1),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

```

```

title('$\{z\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,2),'b',t2,y2(:,2),'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

    subplot(3,1,3)
    t3=ti:dt:tf-dt;
plot(t3,diff(y1(:,2))/dt,'b',t3,diff(y2(:,2))/dt,'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{z}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Aceleração (m/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

    %% Theta - 2
    figure (2)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,3),'b',t2,y2(:,3),'r','LineWidth',2);
%axis([-inf inf -0.1 0.1])
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{\theta\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Deslocamento (rad)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,4),'b',t2,y2(:,4),'r','LineWidth',2);
%axis([-inf inf -0.1 0.1])
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade (rad/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
        plot(t3,diff(y1(:,4))/dt,'b',t3,diff(y2(:,4))/dt,'r','LineWidth',2);
        %axis([-inf inf -0.1 0.1])
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{\theta}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsi
ze',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Aceleração
(rad/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Phi - 3
figure (3)

subplot(3,1,1)
plot(t1,y1(:,5),'b',t2,y2(:,5),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\phi$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15)
;
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deslocamento
(rad)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(3,1,2)
plot(t1,y1(:,6),'b',t2,y2(:,6),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\dot{\phi}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize'
,15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade
(rad/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(3,1,3)
        t3=ti:dt:tf-dt;
        plot(t3,diff(y1(:,6))/dt,'b',t3,diff(y2(:,6))/dt,'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\ddot{\phi}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize
',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Aceleração
(rad/s²)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% z1 e z2 - 4

```

```

figure (4)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,7),'b',t2,y2(:,7),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,8),'b',t2,y2(:,8),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${\dot{z1}}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,9),'b',t2,y2(:,9),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${z2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,10),'b',t2,y2(:,10),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${\dot{z2}}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% z3 e z4 - 5

figure (5)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,11),'b',t2,y2(:,11),'r','LineWidth',2);
grid on
legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('${z3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)
plot(t1,y1(:,12), 'b', t2,y2(:,12), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{z_3}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);

xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,2)

plot(t1,y1(:,13), 'b', t2,y2(:,13), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('${z_4}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deslocamento (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,4)
plot(t1,y1(:,14), 'b', t2,y2(:,14), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')

title('$\dot{z_4}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);

xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Velocidade (m/s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

%% Delta z1 e Delta z2 - 6

figure (6)

subplot(2,2,1)
plot(t1,y1(:,1)-
y1(:,7)+a1*sin(y1(:,5))+b1*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-
y2(:,7)+a1*sin(y2(:,5))+b1*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth', 2);
grid on
legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('${\Delta z_1}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
ylabel('Deformação (m)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

subplot(2,2,3)

```

```

        plot(t1,y1(:,2)-
y1(:,8)+a1*sin(y1(:,6))+b1*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-
y2(:,8)+a1*sin(y2(:,6))+b1*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\dot{\Delta}
z1}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,2)
        plot(t1,y1(:,1)-y1(:,9)+a1*sin(y1(:,5))-
b2*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,9)+a1*sin(y2(:,5))-
b2*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\Delta
z2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,4)
        plot(t1,y1(:,2)-y1(:,10)+a1*sin(y1(:,6))-
b2*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,10)+a1*sin(y2(:,6))-
b2*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\dot{\Delta}
z2}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        %% Delta z3 e Delta z4 - 7

        figure (7)

        subplot(2,2,1)
        plot(t1,y1(:,1)-y1(:,11)-
a2*sin(y1(:,5))+b1*sin(y1(:,3)), 'b', t2,y2(:,1)-y2(:,11)-
a2*sin(y2(:,5))+b1*sin(y2(:,3)), 'r', 'LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\Delta
z3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,3)
        plot(t1,y1(:,2)-y1(:,12)-
a2*sin(y1(:,6))+b1*sin(y1(:,4)), 'b', t2,y2(:,2)-y2(:,12)-
a2*sin(y2(:,6))+b1*sin(y2(:,4)), 'r', 'LineWidth',2);

```

```

        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\dot{\Delta}
z3}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,2)
        plot(t1,y1(:,1)-y1(:,13)-a2*sin(y1(:,5))-
b2*sin(y1(:,3)),'b',t2,y2(:,1)-y2(:,13)-a2*sin(y2(:,5))-
b2*sin(y2(:,3)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\Delta
z4}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deformação (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,2,4)
        plot(t1,y1(:,2)-y1(:,14)-a2*sin(y1(:,6))-
b2*sin(y1(:,4)),'b',t2,y2(:,2)-y2(:,14)-a2*sin(y2(:,6))-
b2*sin(y2(:,4)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')
        title('$\dot{\Delta}
z4}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Velocidade (m/s)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Pos e Vel Mot - 8

figure(8)

subplot(2,1,1)

plot(t1,0.3+y1(:,1)+0.5*sin(y1(:,3))+0.5*sin(y1(:,5)),'b',t2,0.3+y2(:,1)+
0.5*sin(y2(:,3))+0.5*sin(y2(:,5)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

title('$\{m\}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
        xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
        ylabel('Deslocamento (m)','fontweight','bold','fontsize',12);

        subplot(2,1,2)

plot(t1,y1(:,2)+0.5*sin(y1(:,4))+0.5*sin(y1(:,6)),'b',t2,y2(:,2)+0.5*sin(
y2(:,4))+0.5*sin(y2(:,6)),'r','LineWidth',2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle','Controlado')

```

```

title('$\dot{m}$','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15
);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);
    ylabel('Velocidade
(m/s^2)','fontweight','bold','fontsize',12);

%% Aceleraçao vet Mot - 9

    t3=ti:dt:tf-dt;
    am1=0.3.*diff(y1(:,6))/dt-
0.5.*(diff(y1(:,5))/dt).*((diff(y1(:,5))/dt)+(diff(y1(:,3))/dt));
    amj1=-
0.3.*diff(y1(:,4))/dt+0.5.*(diff(y1(:,3))/dt).*((diff(y1(:,5))/dt)+(diff(
y1(:,3))/dt));
    amk1=diff(y1(:,2))/dt-0.5.*diff(y1(:,4))/dt-
0.5.*diff(y1(:,6))/dt-0.3.*(diff(y1(:,3))/dt).*(diff(y1(:,3))/dt)-
0.3.*(diff(y1(:,5))/dt).*(diff(y1(:,5))/dt);
    am1=sqrt(am1.*am1+amj1.*amj1+amk1.*amk1);

    ami2=0.3.*diff(y2(:,6))/dt-
0.5.*(diff(y2(:,5))/dt).*((diff(y2(:,5))/dt)+(diff(y2(:,3))/dt));
    amj2=-
0.3.*diff(y2(:,4))/dt+0.5.*(diff(y2(:,3))/dt).*((diff(y2(:,5))/dt)+(diff(
y2(:,3))/dt));
    amk2=diff(y2(:,2))/dt-0.5.*diff(y2(:,4))/dt-
0.5.*diff(y2(:,6))/dt-0.3.*(diff(y2(:,3))/dt).*(diff(y2(:,3))/dt)-
0.3.*(diff(y2(:,5))/dt).*(diff(y2(:,5))/dt);
    am2=sqrt(ami2.*ami2+amj2.*amj2+amk2.*amk2);

    ax1=[t3' am1];
    ay1=[t3' amj1];
    az1=[t3' amk1];
    ax2=[t3' ami2];
    ay2=[t3' amj2];
    az2=[t3' amk2];
    global ax1
    global ay1
    global az1
    global ax2
    global ay2
    global az2

    figure(9)

    subplot(3,1,1)
    plot(t3,am1,'b',t3,ami2,'r','LineWidth',2);
    grid on
    legend('Sistema sem controle','Controlado')
title('$\ddot{am}$
i','interpreter','latex','fontweight','bold','fontsize',15);
    xlabel('Tempo (s)','fontweight','bold','fontsize',12);

```

```

        ylabel('Aceleração
(m/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(3,1,2)

        plot(t3, amj1, 'b', t3, amj2, 'r', 'LineWidth', 2);
        %axis([-inf inf -0.1 0.1])
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\ddot{am}$
j', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração
(m/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

        subplot(3,1,3)

        plot(t3, amk1, 'b', t3, amk2, 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\ddot{am}$
k', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração
(m/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);

%% Acel Mot - 10

figure (10)

        plot(t3, am1, 'b', t3, am2, 'r', 'LineWidth', 2);
        grid on
        legend('Sistema sem controle', 'Controlado')
title('$\ddot{am}$', 'interpreter', 'latex', 'fontweight', 'bold', 'fontsize',
15);
        xlabel('Tempo (s)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
        ylabel('Aceleração
(m/s²)', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 12);
end

```

Função oct3bank

```
function [p1,f1] = oct3bank(x1,x2);

Fs = 1000;                                % Sampling Frequency

N = 3;                                    % Order of analysis filters.

F = [1 1.25 1.6 , 2 2.5 3.15 , 4 5 6.3 , 8 10 12.5 , 16 20 25 , 31.5 40 50 , 63 80 100 ]; %
Preferred labeling freq.

ff = (10).*((2^(1/3)).^[-10:10]);          % Exact center freq.

global ff

P1 = zeros(1,21);

P2 = zeros(1,21);

m1 = length(x1);

m2 = length(x2);


[Bu,Au] = oct3dsgn(ff(21),Fs,N); % Upper 1/3-oct. band in last octave.

[Bc,Ac] = oct3dsgn(ff(20),Fs,N); % Center 1/3-oct. band in last octave.

[Bl,Al] = oct3dsgn(ff(19),Fs,N); % Lower 1/3-oct. band in last octave.

for j = 6:-1:0

    x2 = decimate(x2,2);

    m2 = length(x2);

    y2 = filter(Bu,Au,x2);
```

```

P2(j*3+3) = sum(y2.^2)/m2;

y2 = filter(Bc,Ac,x2);

P2(j*3+2) = sum(y2.^2)/m2;

y2 = filter(Bl,Al,x2);

P2(j*3+1) = sum(y2.^2)/m2;

end

```

```

for j = 6:-1:0

    x1 = decimate(x1,2);

    m1 = length(x1);

    y1 = filter(Bu,Au,x1);

    P1(j*3+3) = sum(y1.^2)/m1;

    y1 = filter(Bc,Ac,x1);

    P1(j*3+2) = sum(y1.^2)/m1;

    y1 = filter(Bl,Al,x1);

    P1(j*3+1) = sum(y1.^2)/m1;

end

```

```

% Generate the plot

```

```

if (nargout == 0)

```

```

    P1=P1*10^9;

```

```

P2=P2*10^9;

bar(P1,'r');

hold on

bar(P2)

ax = axis;

h24=10^9*[0.28 0.25 0.224 0.2 0.18 0.16 0.14 0.14 0.14 0.14 0.18 0.224 0.280 0.355 0.45
0.560 0.71 0.9 1.12 1.4];

h16=10^9*[0.425 0.375 0.335 .3 .265 .235 .212 .212 .212 .212 .265 .335 .425 .53 .67 .85
1.06 1.32 1.7 2.12];

h8=10^9* [.63 .56 .5 .45 .4 .355 .315 .315 .315 .315 .4 .5 .63 .8 1 1.25 1.6 2 2.5 3.15];

h4=10^9*[1.06 0.95 .85 0.75 0.67 0.6 0.53 .53 .53 .53 .67 .85 1.06 1.32 1.7 2.12 2.65 3.35
4.25 5.3];

h25=10^9*[1.4 1.26 1.12 1.00 .9 .8 .71 .71 .71 .71 .9 1.12 1.4 1.8 2.24 2.8 3.55 4.5 5.6
7.1];

h1=10^9*[2.36 2.12 1.9 1.7 1.5 1.32 1.18 1.18 1.18 1.18 1.5 1.9 2.36 3 3.75 4.75 6 7.5 9.5
11.8];

m25=10^9*[3.55 3.15 2.8 2.5 2.24 2 1.8 1.8 1.8 1.8 2.24 2.8 3.55 4.5 5.6 7.1 9 11.2 14
18];

m16=10^9*[4.25 3.75 3.35 3 2.65 2.35 2.12 2.12 2.12 2.12 2.65 3.35 4.25 5.3 6.7 8.5 10.6
13.2 17 21.2];

m1=10^9*[5.6 5 4.5 4 3.55 3.15 2.8 2.8 2.8 2.8 3.55 4.5 5.6 7.1 9 11.2 14 18 22.4 28];

%text(8,320000,'1 Min');

%text(8,250000,'16 Min');

%text(8,200000,'25 Min');

```

```

%text(8,15000000,'1 Hora');

%text(8,90000000,'2,5 Horas');

%text(8,64000000,'4 Horas');

%text(8,34500000,'8 Horas');

%text(8,24200000,'16 Horas');

%text(8,17000000,'24 Horas');


axis([0 22 ax(3) ax(4)])

set(gca, 'Yscale', 'log')

set(gca,'XTick',[2:3:21]);           % Label frequency axis on octaves.

% set(gca,'XTickLabels',F(2:3:length(F))); % MATLAB 4.1c

set(gca,'XTickLabel',F(2:3:length(F))); % MATLAB 5.1


xlabel('Frequência de banda [Hz]'); ylabel('Aceleração (m/s²)');

title('Espectro de 1/3 de oitava')


plot(h24,'k')

plot(h16)

plot(h8,'g')

plot(h4,'r')

```

```

plot(h25,'c')

plot(h1,'m')

plot(m25,'y')

plot(m16,'--k')

plot(m1,':k')

legend('Sistema sem controle','Sistema controlado','24 Horas','16 Horas','8 Horas','4
Horas','2,5 Horas','1 Hora','25 Minutos','16 Minutos','1 Minuto')

% Set up output parameters

elseif (nargout == 1)

    p1 = P1;

    p2 = P2;

elseif (nargout == 2)

    p1 = P1;

    f1 = F1;

    p2 = P2;

    f2 = F2;

end

global P1

global P2

global graf

```

