



OPERAÇÃO SINCRONIZADA DOS MOTORES LINEARES DE TRACÇÃO PARA  
UM VEÍCULO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Andrei Ernesto Loaiza Luizar

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

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2010

OPERAÇÃO SINCRONIZADA DOS MOTORES LINEARES DE TRACÇÃO PARA  
UM VEÍCULO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Andrei Ernesto Loaiza Luizar

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

Examinada por:



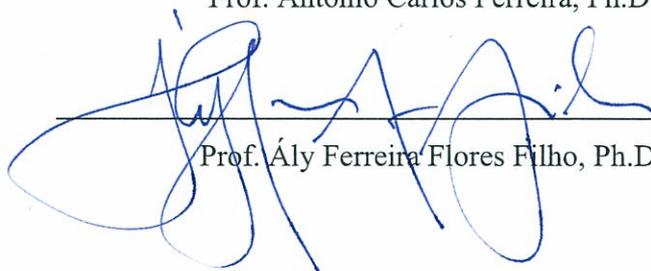
---

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.



---

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.



---

Prof. Ály Ferreira Flores Filho, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2010

Loaiza, Andrei Ernesto Luizar

Operação Sincronizada de Motores Lineares de Tração  
para um Veículo de Levitação Magnética / Andrei Ernesto  
Loaiza Luizar. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIV,103 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia Elétrica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 95-96.

1. Eletrônica de potência. 2. Acionamento de motores.  
3. Supercondutividade. I. Stephan, Richard Magdalena. II.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa  
de Engenharia Elétrica. III. Título.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Tíika e meu Pai Wilbert, especialmente a minha mãe, pois tudo o que ela me deu garantiu o homem que sou hoje.

*“La única lucha que se pierde es la que se abandona”.*

**Ernesto “Che” Guevara**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Richard Magdalena Stephan, pela orientação, e pelo apoio nos momentos mais difíceis deste trabalho.

Aos professores Antônio Carlos Ferreira e Ivan Chabu, pelas valiosas sugestões e contribuições.

Ao pessoal técnico do LASUP, Ocione, Sérgio, André, Jorge, Genésio, Tércis pelo apoio na realização dos testes experimentais. Felipe Saas, Felipe Lessa, Elkin, Thiago e Teresa pelo apoio na revisão e a Gisella Vizhñay pelas contribuições na realização deste trabalho.

Obrigado a todos que direta ou indiretamente me ajudaram nesta caminhada.

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

## OPERAÇÃO SINCRONIZADA DOS MOTORES LINEARES DE TRACÇÃO PARA UM VEÍCULO DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Andrei Ernesto Loaiza Luizar

Dezembro/2010

Orientador: Richard Magdalena Stephan

Programa: Engenharia Elétrica

O trem de levitação magnética (MagLev-Cobra) apresenta-se como uma solução inovadora para o transporte urbano. O veículo, constituído por vários módulos ou vagões, utiliza motores lineares de indução de primário curto para a tração e frenagem de cada módulo. Por sua vez, cada motor é acionado por um inversor eletrônico.

A força de tração do motor linear depende do entreferro, da tensão e da frequência de alimentação do motor. Por outro lado, a força solicitada depende da massa (número de passageiros) e da posição do módulo na trajetória, bem como da aceleração ou frenagem a que está submetido. Os módulos serão interligados através de conexões de borracha, com limites de esforço mecânico para tração e compressão.

Na presente dissertação, propõe-se um controle em malha aberta para a sincronização de dois módulos unitários do MagLev-Cobra. A generalização do método para o caso de 'n' máquinas será objeto de trabalhos futuros. Foram considerados, nas simulações, diferentes valores da constante de elasticidade da borracha de interconexão e casos críticos de operação foram analisados.

Fatores tecnológicos e econômicos indicam o acoplamento rígido como a solução apropriada para a operação guiada por piloto.

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

SYNCHRONIZED OPERATION OF LINEAR MOTORS FOR TRACTION OF A  
MAGNETICALLY LEVITATED VEHICLE

Andrei Ernesto Loaiza Luizar

December/2010

Advisor: Richard Magdalena Stephan

Department: Electrical Engineering

The magnetic levitation train (MagLev-Cobra) presents itself as an innovative solution for urban transportation. The vehicle, consisting of various modules or wagons, uses short primary linear induction motor for traction and braking of each module. In turn, each motor is driven by an electronic inverter.

The linear motor traction force depends on the air gap and the supply voltage and frequency. Moreover, the force required depends on the mass (number of passengers) and the module position in the trajectory as well as acceleration and braking that it is submitted. The modules will be interconnected through connections of rubber, with mechanical limits for tension and compression.

In this dissertation, an open-loop control for the synchronization of two modules is proposed. The generalization of the method in the case of 'n' machines will be the subject of future work. In the simulations, different values of the elasticity constant of the rubber interconnection were considered and critical operational cases were analyzed.

Technological and economic factors indicate a tight coupling as the appropriate solution for the pilot guided operation.

# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 LEVITAÇÃO SUPERCONDUTORA (SML).....	2
1.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	3
1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	4
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
<b>2. MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>6</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	6
2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	9
2.2.1 EQUAÇÕES MATEMÁTICAS.....	9
2.2.2 A FORÇA DE TRAÇÃO.....	14
2.3 CONTROLE PROPOSTO.....	18
2.4 CASOS CRÍTICOS.....	22
2.5 ABORDAGEM ANALITICA.....	25
2.6 CONCLUSÕES.....	28
<b>3. DADOS EXPERIMENTAIS DO MOTOR LINEAR.....</b>	<b>29</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	29
3.2 DADOS DO MOTOR LINEAR.....	29
3.3 CALIBRAÇÃO DO INDICADOR DE PESAGEM.....	29
3.4 MONTAGEM DA CÉLULA DE CARGA.....	31
3.5 ENSAIOS.....	36
3.6 CONCLUSÕES.....	41
<b>4. SIMULAÇÃO.....</b>	<b>42</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	42
4.2 PARÂMETROS PARA O SISTEMA DE CONTROLE.....	42
4.3 TESTES DE COM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS.....	42
4.4 CONCLUSÕES.....	92
<b>5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>93</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>97</b>
A-1 E-MAILS .....	97
A-2 DATA SHEET CÉLULA DE CARGA.....	99
A-3 IMPLEMENTAÇÃO NO SOFTWARE SIMULINK/MATLAB.....	101

# Índice de Figuras

Figura 2.1. a) Concepção do veículo MagLev-Cobra	
b) Vista lateral do mock-up MagLev-Cobra.....	6
Figura. 2.2. a) Concepção do módulo unitário do veículo Maglev-Cobra.	
b) Módulo unitário do Maglev-Cobra. ....	7
Figura. 2.3. a) Vista lateral MagLev-Cobra, com dois módulos unitários. ....	8
b) Vista frontal MagLev-Cobra, com dois módulos unitários.	
Figura. 2.4. Diagrama de corpo livre de dois módulos do veículo MagLev-Cobra.....	9
Figura. 2.5. Diagrama de corpo livre para o módulo 1.....	10
Figura. 2.6. Diagrama de corpo livre para o módulo 2.....	10
Figura. 2.7. a) Estado normal da borracha.	
b) Borracha comprimida.	
c) Borracha estirada.....	12
Figura. 2.8. Diagrama de corpo livre de dois módulos do veículo MagLev-Cobra....	12
Figura. 2.9. Diagrama de corpo livre, módulo 1 sobre um plano inclinado.....	13
Figura. 2.10. Diagrama de corpo livre, módulo 1 sobre um plano inclinado, com eixos X' e Y' .....	13
Figura. 2.11. Diagrama de corpo livre, módulo 2 sobre um plano inclinado.....	14
Figura. 2.12. Variação do <i>gap</i> e entreferro do motor linear.....	15
Figura. 2.13. Curvas Força x Velocidade, para <i>gap</i> = 8,12,16 e 20 mm [4].....	15
Figura. 2.14. Variação do entreferro (1) do motor linear.....	16
Figura. 2.15. Variação do <i>gap</i> para um criostato.....	17
Figura. 2.16. Curvas Força x Velocidade para entreferro= 20 mm.....	19
Figura. 2.17. Bloco Inversor / Motor.....	20
Figura. 2.18. Diagrama de controle para a operação sincronizada de dois veículos do MagLev-Cobra.....	21
Figura. 2.19. Bloco Mola.....	22
Figura. 2.20. Bloco Gap variável. ....	24
Figura. 2.21. Diagrama de controle para a operação sincronizada de dois veículos do MagLev-Cobra em um plano inclinado. ....	25
Figura. 2.22. Diagrama de controle sem saturações.....	25
Figura. 2.23. Lugar das Raízes.....	27
Figura 3.1. Calibração do indicador de pesagem, Peso = 11 kg. ....	30

Figura 3.2. Indicador de pesagem. ....	30
Figura 3.3. Arranjo mecânico para os ensaios.....	31
Figura 3.4. a) Conexão mecânica da célula de carga.....	32
b) Conexão mecânica da célula de carga, vista de perto.	
c) Conexão mecânica da célula de carga, lado do motor.	
d) Conexão mecânica da célula de carga, lado do ponto fixo.	
e) Conexão da célula de carga, lado do ponto fixo detalhe de arranjo mecânico.	
Figura 3.5. Circuito amplificador e placa de aquisição de dados. ....	33
Figura 3.6. a) Placas para limitar o entreferro. Vista superior. ....	34
b) Placas para limitar o entreferro. Vista lateral.	
Figura 3.7. Conjunto de calços isolantes e barra, gap de 12 mm.....	34
Figura 3.8. Calços e barras no largo do primário do motor linear.....	35
Figura 3.9. a) Motor linear segurado pela ponte grua. Vista lateral. ....	35
b) Motor linear segurado pela ponte grua. Vista do lado contrário.	
c) Equipamentos para o ensaio de rotor bloqueado.	
Figura 3.10. Força / Escorregamento, Gap = 8 mm.....	36
Figura 3.11. Corrente / Escorregamento, Gap = 8 mm.....	37
Figura 3.12. Força / Escorregamento, Gap = 12 mm.....	38
Figura 3.13. Corrente / Escorregamento, Gap = 12 mm.....	38
Figura 3.14. Força / Escorregamento, Gap = 16 mm.....	39
Figura 3.15. Corrente / Escorregamento, Gap = 16 mm.....	39
Figura 3.16. Força / Escorregamento, Gap = 20 mm. ....	40
Figura 3.17. Corrente / Escorregamento, Gap = 20 mm.....	41
Figura. 4.1. Freqüência de referência.....	43
Figura. 4.2. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 a, REG = 1.....	45
Figura. 4.3. Força 1 e Força 2, Caso 1 a, REG = 1.....	45
Figura. 4.4. Diferença de posição, Caso 1 a, REG = 1.....	46
Figura. 4.5. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 1 a, REG = 1.....	46
Figura. 4.6. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 b , REG = 1.....	47
Figura. 4.7. Força 1 e Força 2, Caso 1 b, REG = 1.....	47
Figura. 4.8. Diferença de posição, Caso 1 b, REG = 1.....	48
Figura. 4.9. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 1 b, REG = 1.....	48
Figura. 4.10. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 c, REG = 1.....	50
Figura. 4.11. Força 1 e Força 2, Caso 1 c, REG = 1.....	50

Figura. 4.12. Diferença de posição, Caso 1 c, REG = 1.....	51
Figura. 4.13. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1 c, REG = 1.....	51
Figura. 4.14. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 c, REG = 10.....	53
Figura. 4.15. Força 1 e Força 2, Caso 1 c, REG = 10.....	53
Figura. 4.16. Diferença de posição, Caso 1 c, REG = 10.....	54
Figura. 4.17. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1 c, REG = 10.....	54
Figura. 4.18. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 d, REG = 1.....	55
Figura. 4.19. Força 1 e Força 2, Caso 1 d, REG = 1.....	55
Figura. 4.20. Diferença de posição, Caso 1 d, REG = 1.....	56
Figura. 4.21. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1 d, REG = 1.....	56
Figura. 4.22. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 d, REG = 10.....	58
Figura. 4.23. Força 1 e Força 2, Caso 1 d, REG = 10.....	58
Figura. 4.24. Diferença de posição, Caso 1 d, REG = 10.....	59
Figura. 4.25. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1d, REG = 10.....	59
Figura. 4.26. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 2 a, REG = 1.....	61
Figura. 4.27. Força 1 e Força 2, Caso 2 a, REG = 1.....	61
Figura. 4.28. Diferença de posição, Caso 2 a, REG = 1.....	62
Figura. 4.29. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 2 a, REG = 1.....	62
Figura. 4.30. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 2 a, REG = 10.....	64
Figura. 4.31. Força 1 e Força 2, Caso 2 a, REG = 10.....	64
Figura. 4.32. Diferença de posição, Caso 2 a, REG = 10.....	65
Figura. 4.33. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 2 a, REG = 10.....	65
Figura. 4.34. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 2 b, REG = 1.....	66
Figura. 4.35. Força 1 e Força 2, Caso 2 b, REG = 1.....	66
Figura. 4.36. Diferença de posição, Caso 2 b, REG = 1.....	67
Figura. 4.37. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 2 b, REG = 1.....	67
Figura. 4.38. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 2 b, REG = 10.....	69
Figura. 4.39. Força 1 e Força 2, Caso 2 b, REG = 10.....	69
Figura. 4.40. Diferença de posição, Caso 2 b, REG = 10.....	70
Figura. 4.41. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 2 b, REG = 10.....	70
Figura. 4.42. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 a, REG = 1.....	72
Figura. 4.43. Força 1 e Força 2, Caso 3 a, REG = 1.....	72
Figura. 4.44. Diferença de posição, Caso 3 a, REG = 1.....	73
Figura. 4.45. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 a, REG = 1.....	73

Figura. 4.46. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 a, REG = 10. ....	75
Figura. 4.47. Força 1 e Força 2, Caso 3 a, REG = 10.....	75
Figura. 4.48. Diferença de posição, Caso 3 a, REG = 10.....	76
Figura. 4.49. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 3 a, REG = 10.....	76
Figura. 4.50. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 b, REG = 1.....	77
Figura. 4.51. Força 1 e Força 2, Caso 3 b, REG = 1.....	77
Figura. 4.21. Diferença de posição, Caso 3 b, REG = 1.....	78
Figura. 4.53. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 3 b, REG = 1.....	78
Figura. 4.54. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 b, REG = 10.....	80
Figura. 4.55. Força 1 e Força 2, Caso 3 b, REG = 10.....	80
Figura. 4.56. Diferença de posição, Caso 3 b, REG = 10.....	81
Figura. 4.7. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 3 b, REG = 10.....	81
Figura. 4.58. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 c, REG = 1.....	82
Figura. 4.59. Força 1 e Força 2, Caso 3 c, REG = 1.....	82
Figura. 4.60. Diferença de posição, Caso 3 c, REG = 1.....	83
Figura. 4.61. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 3 c, REG = 1.....	83
Figura. 4.62. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 c, REG = 10.....	85
Figura. 4.63. Força 1 e Força 2, Caso 3 c, REG = 10.....	85
Figura. 4.64. Diferença de posição, Caso 3 c, REG = 10.....	86
Figura. 4.65. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 3 c, REG = 10.....	86
Figura. 4.66. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 d, REG = 10.....	87
Figura. 4.67. Força 1 e Força 2, Caso 3 d, REG = 1.....	87
Figura. 4.68. Diferença de posição, Caso 3 d, REG = 1.....	88
Figura. 4.69. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 3 d, REG = 1.....	88
Figura. 4.70. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 d, REG = 10.....	90
Figura. 4.71. Força 1 e Força 2, Caso 3 d, REG = 10.....	90
Figura. 4.72. Diferença de posição, Caso 3 d, REG = 10.....	91
Figura. 4.73. Freqüência 1 e Freqüência 2, Caso 3 d, REG = 10.....	91

## Índice de Tabelas

Tabela 1.1. Diferença de consumo nas tecnologias de levitação magnética.....	3
Tabela 2.1. Gap/Entreferro.Figura. 2.15. Variação do <i>gap</i> para um criostato.....	16
Tabela 2.2. <i>Gap</i> /Força. Tabela 2.3. <i>Gap</i> /Força de Levitação, módulo unitário (6 criostatos).....	17
Tabela 2.3. <i>Gap</i> /Força de Levitação, módulo unitário (6 criostatos).....	18
Tabela 2.4. Diferença de velocidade.Figura. 2.17. Bloco Inversor / Motor.....	19
Tabela 2.5. Ganhos para diferentes entreferos (para 25 Hz e 420 Vac).....	21
Tabela 2.6. Valores de Gap interpolados para o módulo unitário.....	23
Tabela 2.7. Ganhos interpolados, para entreferos de 13.70 e 5,24 mm (25 Hz).....	23
Tabela 3.1. Características do Motor Linear.....	29
Tabela 3.2. Valores medidos para entreferro =8 mm.....	36
Tabela 3.3. Valores medidos para entreferro =12 mm. ....	37
Tabela 3.4. Valores medidos para entreferro =16 mm. ....	38
Tabela 3.5. Valores medidos para entreferro =20 mm.....	40
Tabela 4.1. Parâmetros para a simulação de trajetória plana e massa constante.....	44
Tabela 4.2. Parâmetros para a simulação com trajetória plana e variação de massa..	60
Tabela 4.3. Parâmetros para a simulação com trajetória inclinada.....	71

## Lista de Símbolos

a: aceleração.

$\alpha$  : Ângulo de inclinação sobre o eixo X.

$\Delta V$  = velocidade de escorregamento.

$\Delta X$ : Distância de alongamento ou encurtamento da mola.

$F_{M1}, F_{M2}$  = Força de tração do motor linear 1 e 2, respectivamente.

$F_{mg1}, F_{mg2}$  : Peso do módulo 1 e 2, respectivamente.

f: Freqüência.

$F_R$ : Força elástica.

$F_{R1}$  = Força elástica da mola sobre a massa 1.

$F_{R2}$  = Força elástica da mola sobre a massa 2.

$F_R$ : Força elástica.

$\sum F_x$ : Somatória das forças no eixo X.

Gapm1: Entreferro do motor 1.

Gapm2: Entreferro do motor 2.

K: Constante elástica da mola.

M: Massa.

$M_1, M_2$  = Massa do veículo 1 e 2, respectivamente.

m: Inclinação da reta.

REG: ganho.

s: Segundo.

t : Tempo.

$\tau$  : Passo polar.

v : Velocidade.

$v_1, v_2$  : Velocidade do veículo 1 e 2, respectivamente.

$V_1, V_2$ : Transformada de Laplace do sinal  $v_1, v_2$ , respectivamente.

$v_m$ : Velocidade linear.

x: Posição.

$x_1, x_2$  : Posição do veículo 1e 2, respectivamente.

$X_1, X_2$ : Transformada de Laplace do sinal  $x_1, x_2$ , respectivamente.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 MOTIVAÇÃO.

Atualmente, uma das prioridades do mundo consiste em reduzir ao máximo as emissões de gases poluidores. Nesse aspecto, as metrópoles, onde estão concentradas grandes populações, precisam de um transporte público não poluidor, com custos de implantação e manutenção menores.

Nas cidades, os metrô subterrâneos podem ser considerados como modelos de solução. No entanto, o custo destas vias encontra-se na faixa de 100 a 300 milhões de Reais por km, dependendo do tipo de solo, além de elevado tempo de implantação, que também deve ser considerado [1].

Na busca de uma solução que contemple todas essas condições, propõe-se a tecnologia MagLev-Cobra: um veículo de transporte público de levitação magnética supercondutora, com baixa poluição sonora e de articulações múltiplas que permitirá efetuar curvas com raios de 50 metros, vencer aclives de até 15% e operar a uma velocidade aproximada de 70km/h [1]. Estas características permitem o MagLev-Cobra harmonizar-se com a arquitetura e geografia das cidades em vias elevadas ou ao nível do solo [2].

Esta proposta tem um custo de implantação da ordem de 1/3 do necessário para um metrô, sendo também o tempo de implantação muito menor [1].

O sistema MagLev-Cobra vale-se das propriedades diamagnéticas (comportamento dos materiais serem repelidos na presença de campos magnéticos) dos supercondutores e do campo magnético produzido por ímãs de Nd-Fe-B (uma liga de Neodímio, Ferro e Boro) para obter a levitação [3].

Por não depender de atrito mecânico, a tração e frenagem do veículo MagLev-Cobra são obtidas através da ação de um motor linear, sendo movido pela energia elétrica.

No Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da COPPE/UFRJ comprovou-se a viabilidade desta tecnologia, através de modelos funcionais em escala reduzida. O protótipo em escala real, hora em construção, operará em uma linha de testes com 200m de extensão, ligando os dois blocos do Centro de Tecnologia na UFRJ [3].

Este desafio desvela uma vasta gama de problemas que vem motivando trabalhos de pesquisa, teses e projetos de fim de curso.

## **1.2 LEVITAÇÃO SUPERCONDUTORA (SML).**

Este tipo de levitação baseia-se no efeito Meissner, que consiste na exclusão do campo magnético do interior de supercondutores. Esta solução tecnológica ainda não foi implementada em escala real. Este método só pode ser devidamente explorado a partir do final do século XX com o advento de novos materiais magnéticos ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (NdFeB) e pastilhas supercondutoras ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (YBCO)), que operam a altas temperaturas críticas (HTS). Os supercondutores de alta temperatura crítica podem ser resfriados com nitrogênio líquido enquanto que os supercondutores convencionais precisam ser refrigerados com hélio líquido, o que torna o custo de refrigeração muito elevado [1].

Este tipo de levitação não requer controle para a levitação, isto por que, no caso dos supercondutores do tipo II, esta exclusão é parcial, diminuindo a força de levitação, mas conduzindo à estabilidade da levitação.

A tecnologia SML é mais adequada para o transporte urbano. Para mostrar isto, basta considerar a potência necessária para levantar um veículo baseado no método eletromagnético (ELM) que é da ordem de 1,7kW/t (Tabela 1.1). Em altas velocidades, este valor torna-se comparativamente pequeno em relação à potência necessária para a tração, apontando para ligações interurbanas, quando a alta velocidade tem um papel preponderante. Já no caso SML, a potência necessária para

levitação é praticamente zero. No entanto, a linha de ímãs, necessária para promover o efeito diamagnético, é mais cara que a infra-estrutura da outra opção, favorecendo aplicações de curta distância e uso intensivo.

Tabela 1.1. Diferença de consumo nas tecnologias de levitação magnética [1].

<b>Velocidade</b>	<b>Tração</b>	<b>Levitação SML</b>	<b>Levitação EML</b>
70 km/h	150 kW	~0 kW	500 kW
450 km/h	10.500 kW	~ 0 kW	500 kW

### **1.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.**

O sistema foi apelidado de MagLev-Cobra tendo em vista que será composto de pequenos módulos, fazendo que o movimento se assemelhe ao serpentejar de uma cobra. Estes módulos serão interligados através de conexões de borracha, com limites de tração e compressão. Cada módulo, por sua vez, é tracionado independentemente por um motor linear de indução de primário curto. Cada motor é acionado por um inversor CFW-11 da WEG. O inversor CFW-11 tem incorporado uma função SoftPLC através do software WLP, que controla a operação dos inversores e pode ser programado através da linguagem LADDER, para coordenar a operação sincronizada de vários motores lineares. As curvas de força de tração do motor linear dependem do entreferro (*gap* do motor), da tensão e da frequência de alimentação do motor. Por sua vez, a força solicitada depende da massa (número de passageiros) e da posição do módulo na trajetória, bem como da aceleração ou frenagem a que está submetido.

Conforme apresentado, a implementação do MagLev-Cobra constitui uma ótima solução para a demanda crescente de transporte público eficiente não poluidor. No entanto, há ainda o aspecto a ser analisado da sincronização dos motores lineares usados para a tração e frenagem nos veículos ou módulos unitários que vão conformar o MagLev-Cobra.

Nesse sentido, uma nova abordagem se torna necessária, que é uma técnica de controle que permita a operação sincronizada dos módulos do veículo MagLev-Cobra, o qual permitirá maior conforto dos passageiros e excelência da tecnologia em desenvolvimento.

## **1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO.**

O trabalho objetiva o desenvolvimento de uma técnica de controle e operação que permitirá o deslocamento suave do veículo MagLev-Cobra, minimizando os esforços transmitidos pelos elementos de interligação. Para tanto, a escolha dos sensores e sinais de realimentação, bem como da técnica de controle, revestem-se de crucial importância, especialmente quando se consideram restrições de custo e robustez.

Mais especificamente, nesta tese, objetiva-se o estabelecimento do procedimento que permitirá a operação através do comando de velocidade fornecido por um operador ou condutor do veículo. Não se trata, portanto, de operação autônoma, que pertence à categoria dos APM (Automated People Mover). Os resultados serão conduzidos de modo a avaliar a aplicabilidade do pedido de patente PI 0812685-2 “Conector de módulo de transporte de levitação magnética supercondutora”.

O controle proposto será implementado no Matlab e poderá ser programado no inversor através da linguagem de programação LADDER, que está incluída na função SoftPLC do inversor CFW-11 da WEG. A presente tese se restringirá ao caso do controle de dois motores lineares. A generalização do método para o caso de ‘n’ máquinas será objeto de trabalhos futuros.

O presente trabalho foi desenvolvido nos laboratórios: LABMAQ (Laboratório de Maquinas Elétricas) e LASUP (Laboratório de Aplicações de Supercondutores) da COPPE/UFRJ.

## **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.**

O sumário de cada capítulo é apresentado a seguir permitindo uma visualização geral do trabalho.

Neste capítulo I, foi apresentada a caracterização do problema, o posicionamento da tecnologia, bem como a motivação, a importância e o objetivo principal da dissertação.

No capítulo II, é realizada a modelagem, baseando-se nas leis de Newton para a dinâmica do sistema. Serão levados em conta três casos diferentes, considerados os mais críticos na operação do MagLev-Cobra.

No capítulo III, são apresentados os testes experimentais de rotor bloqueado para obter as curvas força/escorregamento do motor linear.

No capítulo IV, são apresentadas as simulações com a técnica de controle proposta, para os casos considerados.

No capítulo V, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

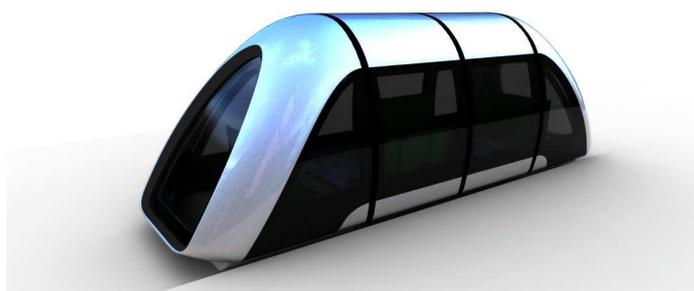
O trabalho é complementado pela lista de referências bibliográficas e pelos anexos.

## Capítulo 2

### Modelo Matemático

#### 2.1 INTRODUÇÃO.

O trem de levitação supercondutora MagLev–Cobra é composto de vários módulos unitários interligados entre si por um elemento de interligação (borracha, goma, sanfona flexível, interligação rígida, mola, etc), que permite a articulação do trem, sendo então o elemento de interligação, um componente importante na modelagem e simulação. A Figura 2.1 apresenta o desenho protótipo e o mock-up em escala real do MagLev–Cobra. A Figura 2.2 mostra o desenho de um módulo e sua versão final.



a)



b)

Figura 2.1. a) Concepção do veículo MagLev-Cobra.

b) Vista lateral do mock-up MagLev-Cobra.



a)

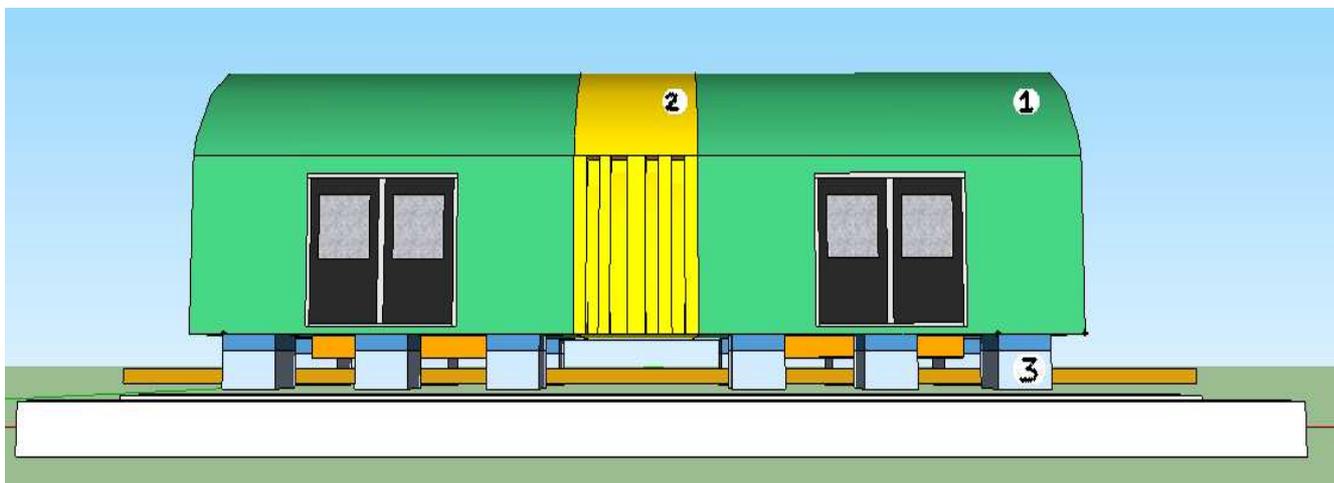


b)

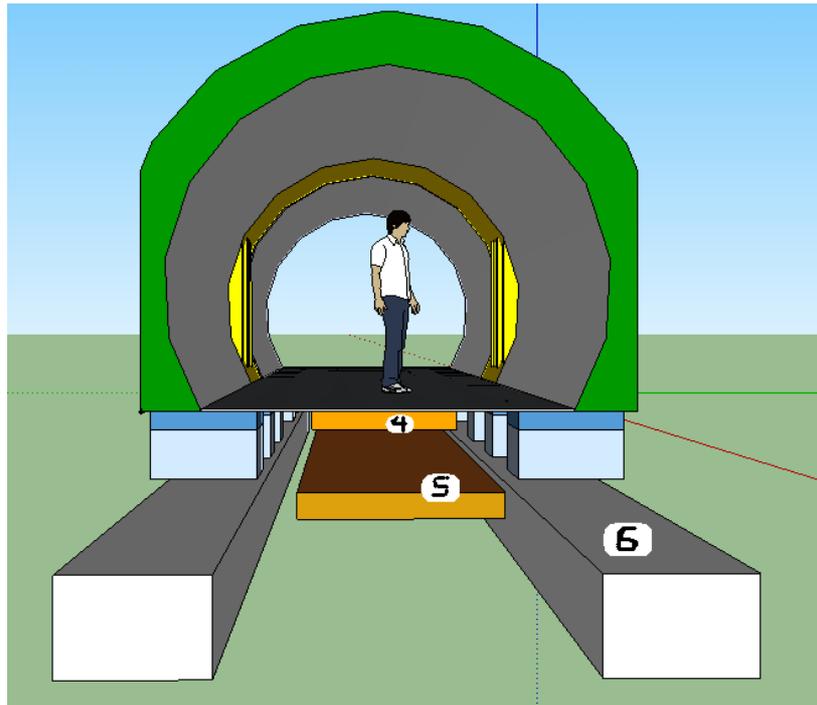
Figura. 2.2. a) Concepção do módulo unitário do veículo Maglev-Cobra.

b) Módulo unitário do Maglev-Cobra.

Todos os módulos deverão estar perfeitamente sincronizados para operar como se fosse um único sistema. Cada módulo tem tração independente dada por um motor linear de primário curto, por sua vez acionado por um inversor eletrônico. Como foi explicado anteriormente, a tese se limitará no controle de dois módulos unitários. A figura seguinte mostra dois módulos unitários interligados entre si.



a)



b)

Figura. 2.3. a) Vista lateral MagLev-Cobra, com dois módulos unitários.

b) Vista frontal MagLev-Cobra, com dois módulos unitários.

Onde:

1. Módulo unitário MagLev-Cobra.
2. Elemento de interligação.
3. Criostato.
4. Primário do motor linear.
5. Secundário do motor linear.
6. Trilho de imãs.

Fazendo uma classificação simples dos componentes mais importantes do MagLev-Cobra, podemos considerar 5 componentes: módulos unitários, elementos de interligação, criostatos, motor linear, trilho de imãs, como se mostrou na figura 2.3.

Neste capítulo, é realizada a modelagem matemática para um sistema composto por dois módulos unitários. O modelo baseia-se nas leis de Newton para a dinâmica do sistema.

## 2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA.

### 2.2.1 EQUAÇÕES MATEMÁTICAS.

Para facilitar a análise, o estudo será feito considerando as forças que atuam sobre cada um dos módulos unitários. Para o movimento apenas no eixo horizontal, o peso sobre os módulos unitários pode ser desprezado na modelagem. A figura 2.4 mostra as forças que influenciam o sistema.

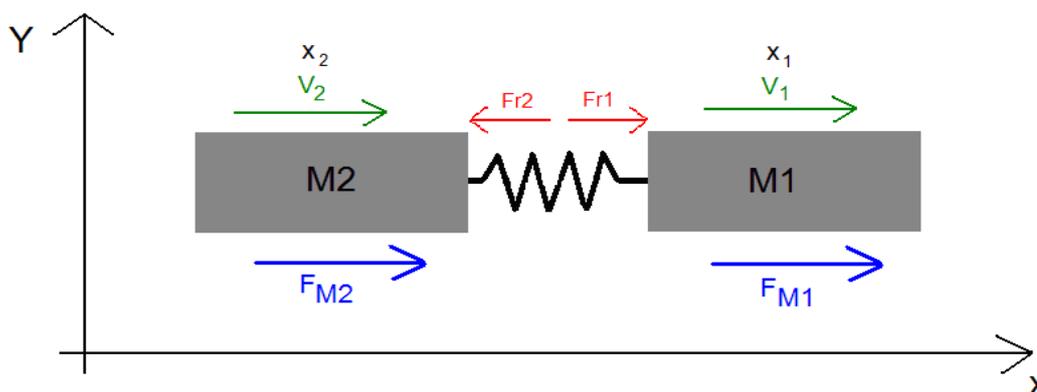


Figura. 2.4. Diagrama de corpo livre de dois módulos do veículo MagLev-Cobra.

Nota: A força de atrito com o ar, não foi considerada na simulação.

Onde:

$F_{M1}$ ,  $F_{M2}$  = Força de tração do motor linear 1 e 2, respectivamente.

$M_1$ ,  $M_2$  = Massa do veículo 1 e 2, respectivamente.

$F_{R1}$  = Força elástica da mola sobre a massa 1.

$F_{R2}$  = Força elástica da mola sobre a massa 2.

$v_1$ ,  $v_2$  = Velocidade do veículo 1 e 2, respectivamente.

$x_1$ ,  $x_2$  = Posição do veículo 1 e 2, respectivamente.

A seguinte equação representa o comportamento das forças sobre os módulos unitários da figura 2.4 e é baseada nas leis de Newton para a dinâmica de um sistema:

$$\sum F_x = Ma \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Onde:

$\sum F_x$ : Somatória das forças no eixo X.

M: Massa [kg]

a: aceleração [m/s<sup>2</sup>]

A aceleração, na equação 2.1, é dada por:

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

Onde:  $v$ : Velocidade [m/s]

$x$ : Posição [m]

$t$ : Tempo [s]

Substituindo (2.2), na equação (2.1), tem-se:

$$\sum F_x = M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = M \ddot{x} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Então, analisando independentemente o módulo 1, tem-se que as forças que atuam sobre ele são:

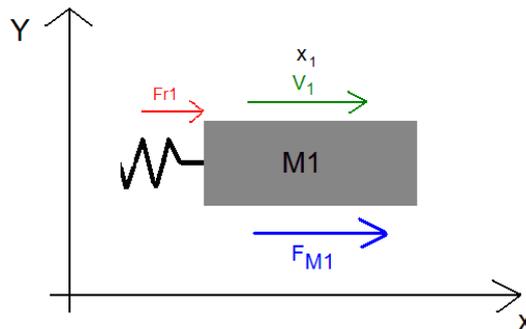


Figura. 2.5. Diagrama de corpo livre para o módulo 1.

$$F_{M1} + F_{R1} = M_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Para o módulo 2, tem-se que as forças que atuam sobre ele são:

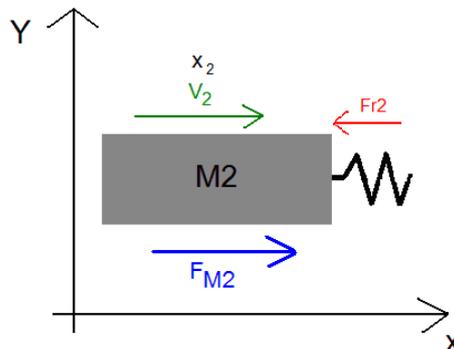


Figura. 2.6. Diagrama de corpo livre para o módulo 2.

$$F_{M2} - F_{R2} = M_2 \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Pode-se observar que, sobre cada módulo unitário, existem duas forças, a força de tração e a força elástica do elemento de interligação.

A força elástica, do elemento de interligação, tem um comportamento que é análogo ao comportamento físico de uma mola. A força elástica é dada pela seguinte equação:

$$F_R = -K \cdot \Delta x \quad \text{Eq. (2.6)}$$

Onde:

$F_R$ : Força elástica [N].

$K$ : Constante elástica da mola (depende do material e das características da mola).

$\Delta x$ : Distância de alongamento ou encurtamento da mola. [m]

As forças elásticas serão iguais em grandeza, mas com sentido diferente, como se observou na figura 2.4. Assim:

$$-F_{R1} = F_{R2} = |K \cdot \Delta x| \quad \text{Eq. (2.7)}$$

As equações 2.4 e 2.5 podem representar-se como:

$$\frac{F_{M1}}{M_1} + \frac{F_{R1}}{M_1} = \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

$$\frac{F_{M2}}{M_2} - \frac{F_{R2}}{M_2} = \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

O referencial para a determinação da posição do veículo 1 foi escolhido deslocado de  $x_0$  em relação ao referencial para a medição da posição do veículo 2. Com isto, quando o elemento de interligação encontra-se livre de tensões mecânicas,  $x_1 - x_2 = 0$ . Com isso:

$$\Delta x = x_1 - x_2 \quad \text{Eq. (2.10)}$$

A variação de  $\Delta x$  terá um limite máximo e mínimo de deformação, respectivamente, definido pelas características mecânicas do elemento de interligação.

A figura 2.7. mostra os casos em que a borracha é comprimida e estirada.

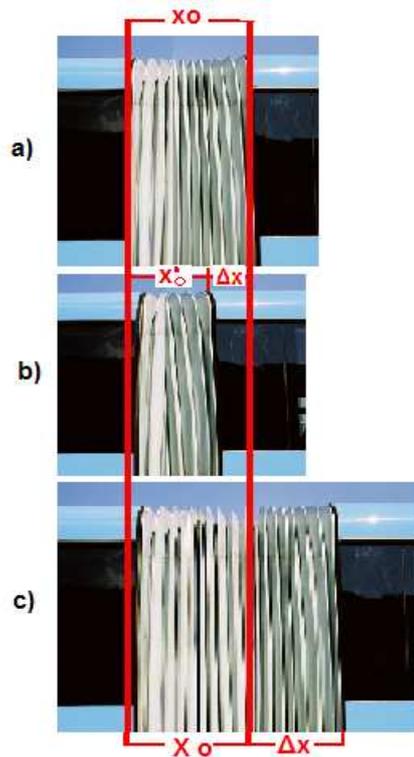


Figura. 2.7. a) Estado normal da borracha.

b) Borracha comprimida.

c) Borracha estirada.

O caso (a) acontece quando a diferença de posição entre os veículos é zero.

O caso (b) acontece quando  $x_1 < x_2$ . Então a velocidade do veículo 2 é maior ao do veículo 1.

O caso (c) acontece quando  $x_1 > x_2$ . Então a velocidade do veículo 1 é maior ao do veículo 2.

Foi projetado que o trem poderá operar sobre planos inclinados. Para esta análise considera-se o peso do módulo pela inclinação do trilho ( $\alpha$ ) sobre o eixo X. O diagrama de corpo livre pode ser visto na figura 2.8.

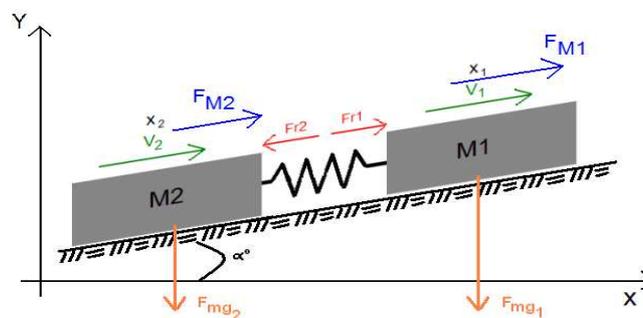


Figura. 2.8. Diagrama de corpo livre de dois módulos do veículo MagLev–Cobra sobre um plano inclinado.

Onde:  $F_{mg1}, F_{mg2}$  = Peso do módulo 1 e 2, respectivamente.

$\alpha$  = Ângulo de inclinação sobre o eixo X.

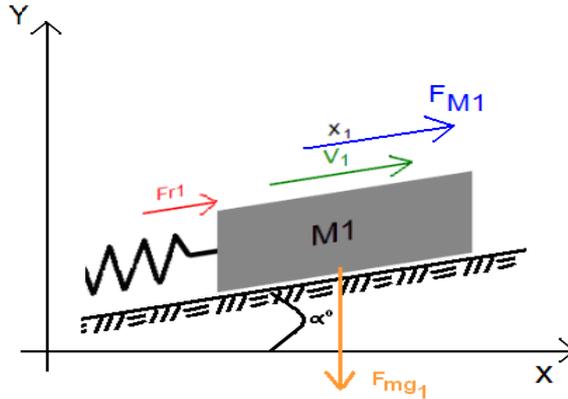


Figura. 2.9. Diagrama de corpo livre, módulo 1 sobre um plano inclinado.

Ou também:

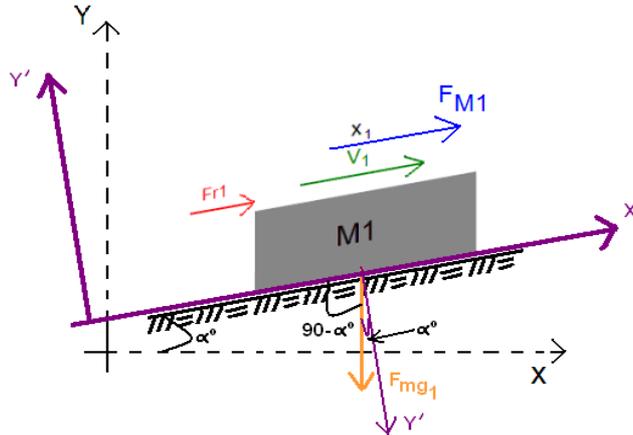


Figura. 2.10. Diagrama de corpo livre, módulo 1 sobre um plano inclinado, com eixos X' e Y'.

Considerando que o trem se move sobre o eixo X', no sentido positivo, então as forças que atuam sobre o módulo 1 são:

$$F_{M1} + F_{R1} - F_{mg1} \cos(90 - \alpha) = M_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.11)}$$

$$F_{M1} + F_{R1} - F_{mg1} \sin(\alpha) = M_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.12)}$$

$$F_{M1} + F_{R1} - M_1 g \sin(\alpha) = M_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.13)}$$

$$\frac{F_{M1}}{M_1} + \frac{F_{R1}}{M_1} - \frac{M_1 g \sin(\alpha)}{M_1} = \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.14)}$$

$$\frac{F_{M1}}{M_1} + \frac{F_{R1}}{M_1} - g \sin(\alpha) = \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.15)}$$

De forma similar, para o módulo 2, tem-se que as forças que atuam sobre ele são:

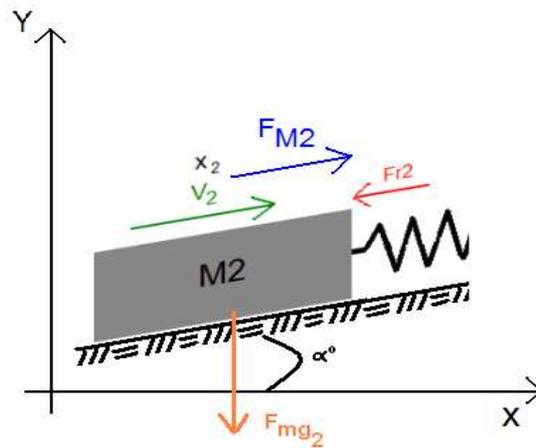


Figura. 2.11. Diagrama de corpo livre, módulo 2 sobre um plano inclinado.

A equação para o módulo 2 é a similar á equação (2.15):

$$\frac{F_{M2}}{M_2} + \frac{F_{R2}}{M_2} - g \sin(\alpha) = \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (2.16)}$$

### 2.2.2 A FORÇA DE TRACÇÃO.

A força de tração é controlada pelo inversor CFW-11 e depende da tensão e frequência de alimentação. No caso do MagLev-Cobra, há um problema adicional com o entreferro (*gap* do motor linear), pois este varia em função da massa sobre os módulos. Na presente aplicação, o motor linear ainda possui um desenho mecânico diferente, que é mostrado na figura 2.12, com o objetivo de aproveitar as correntes de primário para auxiliar na força de levitação.

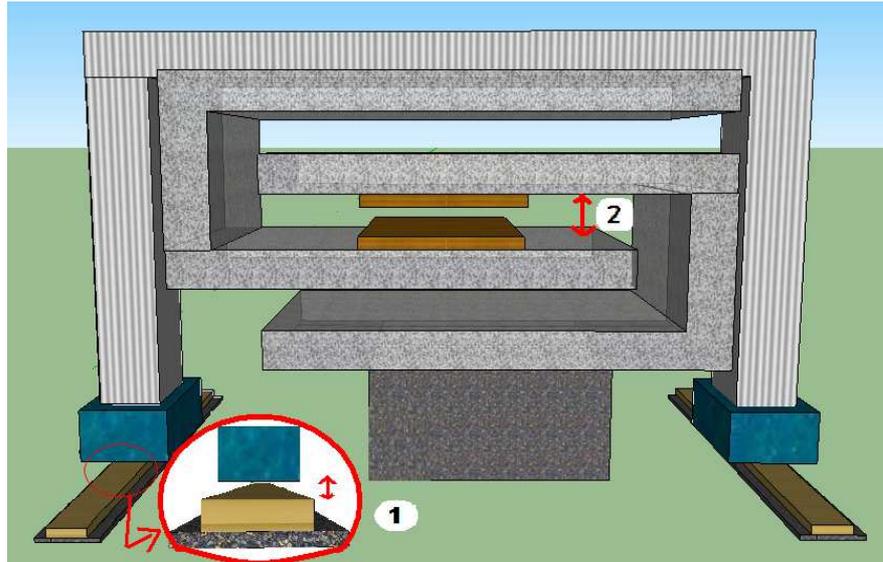


Figura. 2.12. Variação do *gap* e entreferro do motor linear.

Onde:

1. Gap, representa a distancia entre o trilho de ímãs e os criostatos.
2. Entreferro, representa a distancia entre o primário e o secundário do motor linear.

A variação do entreferro do motor linear influenciará a força de tração de cada módulo unitário, como pode ser visto na figura 2.13 para a alimentação em 420 Vac e 25 Hz [4].

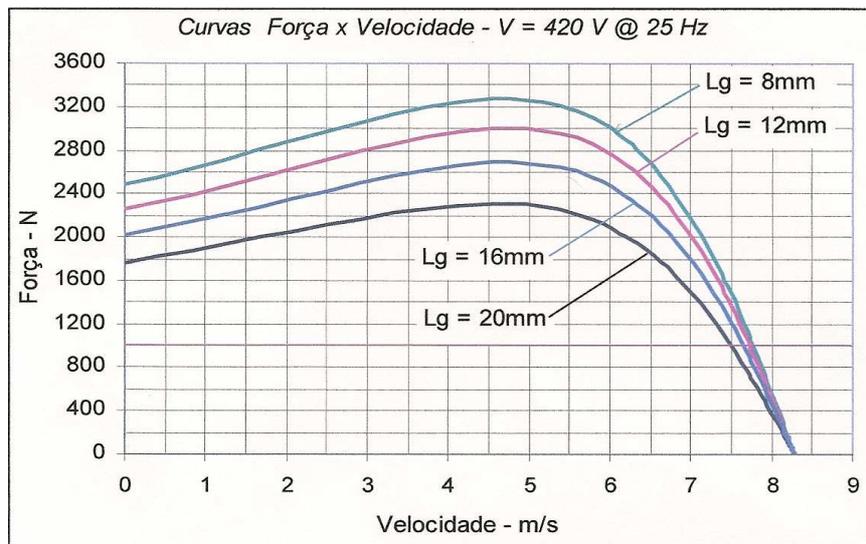


Figura. 2.13. Curvas Força x Velocidade, para entreferro = 8,12,16 e 20 mm [4].

Observa-se que, para cada entreferro, existe uma curva relacionando força com velocidade.

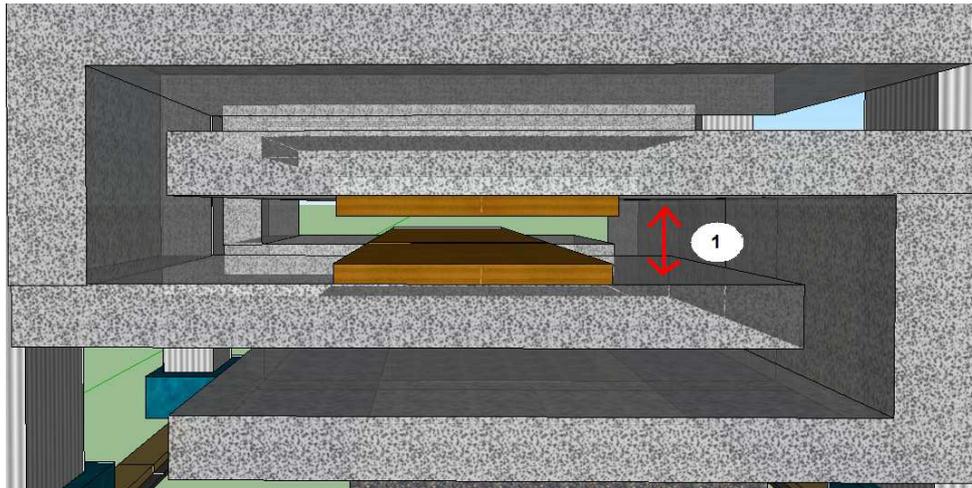


Figura. 2.14. Variação do entreferro (1) do motor linear.

O entreferro varia diretamente em função dos *gaps* dos criostatos. Se a massa sobre o módulo unitário aumentar, o *gap* dos criostatos diminui e o entreferro do motor aumenta. Caso contrário, se a massa diminuir, o *gap* dos criostatos aumenta e o entreferro diminui. Então a tabela 2.1. mostra a relação direta entre o *gap* dos criostatos e o entreferro do motor.

Tabela 2.1. Gap/Entreferro.

<b>Gap [mm]</b>	<b>Entreferro [mm]</b>
8	14
9	13
10	12
11	11
12	10

Os criostatos são os apoios mecânicos dos primários dos motores lineares como se vê na figura 2.3. No caso dos criostatos, o *gap* varia em função da força ou massa sobre ele. Para a determinação desses valores tomou-se como referência os testes feitos no LASUP e apresentados na figura 2.15.

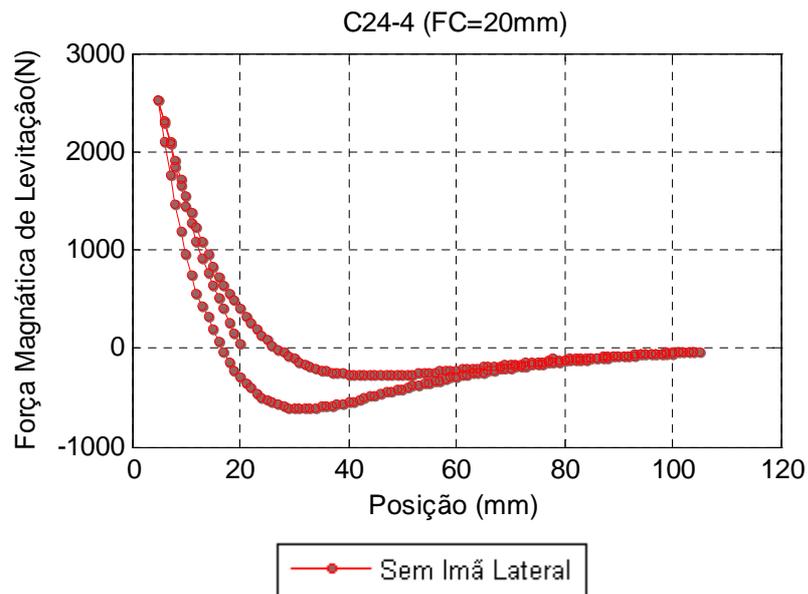


Figura. 2.15. Variação do *gap* para um criostato [LASUP-COPPE].

Para os valores conhecidos do entreferro, tem-se os seguintes valores de *gap* e força de levitação, mostrados na tabela 2.2:

Tabela 2.2. *Gap*/Força.

<b>Gap [mm]</b>	<b>Força de Levitação [N]</b>
20	38
16	520
12	1088
8	1850
5	2500

Nota: Pode se observar na figura 2.15, que os valores limites são para os *gaps* de 20 e 5 mm.

No módulo unitário, são utilizados 6 criostatos, assim, para obter a força de levitação, os valores da força de levitação da tabela 2.2 são multiplicados por seis. A tabela 2.3 mostra os resultados para o módulo unitário.

Tabela 2.3. *Gap*/Força de Levitação, módulo unitário (6 criostatos).

<b>Gap [mm]</b>	<b>Força [N]</b>	<b>Massa [kg]</b>
20	228	23
16	3120	312
12	6528	653
8	11100	1110
5	15000	1500

O valor do entreferro de operação não será apenas função da massa do veículo, como apresentado na tabela 2.3, mas também da contribuição da força vertical presente na configuração do motor linear proposto.

Esta força vertical depende inversamente do valor de entreferro e diretamente da corrente circulante, numa relação quadrática. Por sua vez, a corrente circulante é uma função da força de tração solicitada e também do entreferro.

O resultado desta combinação de efeitos será um valor de entreferro diferente do que o apresentado na referida tabela 2.3. Portanto, se todos os fatores fossem considerados, o valor de ganho no modelo do motor linear, empregado nas simulações, seria diferente.

Na ausência de valores precisos desta força vertical e considerando que para as simulações aqui apresentadas o efeito final recairia sobre o valor deste ganho, cuja variação já será avaliada ao longo das simulações, este refinamento nos cálculos não foi aqui considerado.

### **2.3 CONTROLE PROPOSTO.**

Na figura 2.16. observa-se que as curvas de força do motor linear são aproximadamente proporcionais à variação de velocidade ( $\Delta V$  = velocidade de escorregamento) até a força de 1200 N. Os valores de  $\Delta V$  observados estão apresentados na tabela 2.4.

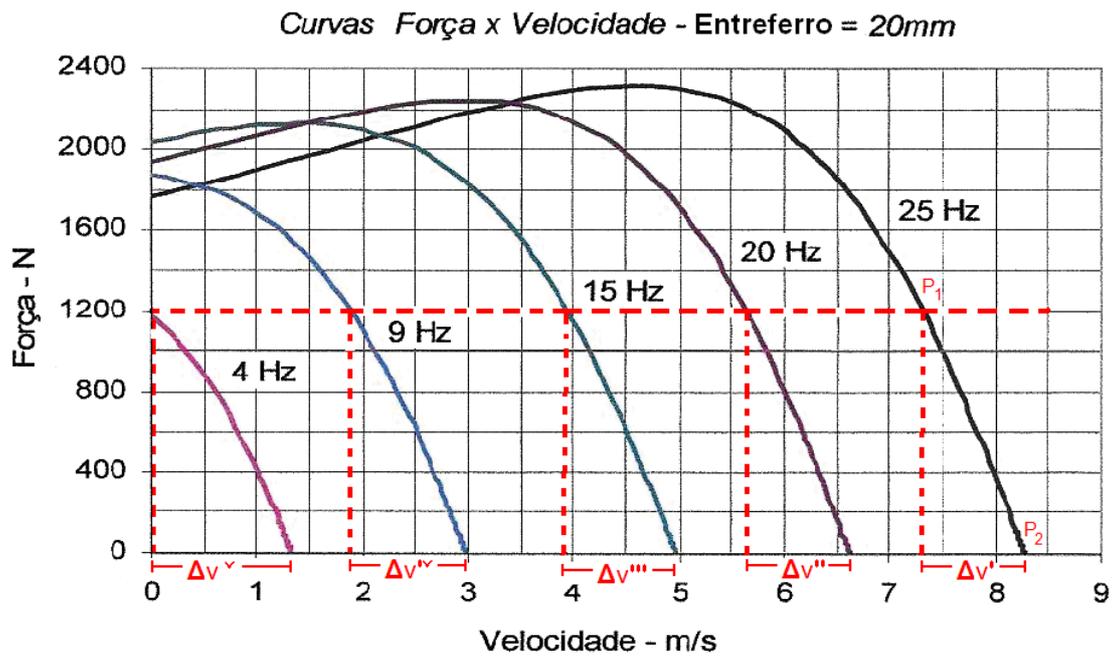


Figura. 2.16. Curvas Força x Velocidade para entreferro= 20 mm.

Nota: Nos testes realizados no capítulo III comprovou-se os valores de força para a velocidade igual a zero (teste de rotor bloqueado).

Tabela 2.4. Diferença de velocidade.

Frequência [Hz]	$\Delta V$ [m/s]
4	1,35
9	1,20
15	1,10
20	1,00
25	0,95

A partir destas observações, as forças de tração FM1 e FM2, empregadas nas equações 2.9 e 2.10, estão representadas num bloco chamado inversor/motor dado na figura 2.17. Este bloco tem como sinal de entrada a frequência de referência e a velocidade do módulo, dada por [5]:

$$v_m = 2f\tau \text{ Eq. (2.17)}$$

Onde:

$\tau$  ; Passo polar [m]

f: Frequência [Hz]

$V_m$ : Velocidade linear [m/s]

O passo polar é de  $\tau = 0,16$  m.

A diferença entre a frequência e a velocidade é limitada (saturação) para a velocidade de escorregamento não ultrapassar os valores da tabela 2.4. Em seguida, este sinal é multiplicado por um ganho que é função do entreferro do motor linear, que, por sua vez, depende da massa do módulo.

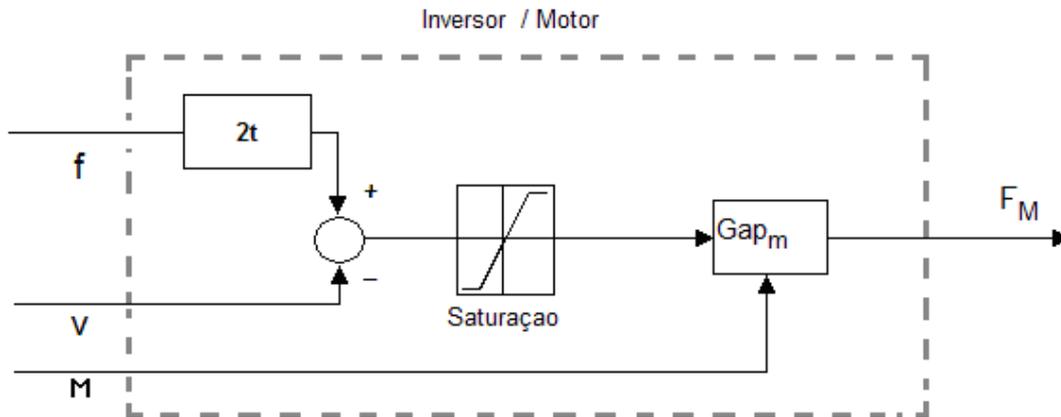


Figura. 2.17. Bloco Inversor / Motor.

O pior caso ocorre quando  $\Delta V = 0,95$  m/s, portanto esse valor foi eleito para a saturação. Sendo este valor positivo quando a máquina funciona como motor e negativo quando funciona como gerador,

O ganho para cada entreferro do motor ( $Gap_m$ ) foi calculado com base na figura 2.16. Para o cálculo, usou-se a equação da reta:

$$Y = mX + b \text{ Eq. (2.18)}$$

$$m = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} \text{ Eq. (2.19)}$$

Onde:

m: Inclinação da reta.

$Y_2, Y_1, X_2, X_1$ : Valores das coordenadas cartesianas, para os pontos  $P_1(X_1, Y_1)$  e  $P_2(X_2, Y_2)$ .

Da figura 2.16, para a curva de 25 Hz tem-se que:

$$P_1 = (7,35 ; 1200), P_2 = (8,25; 0)$$

Então a inclinação da reta é:

$$m = \frac{(0 - 1200)}{(8,25 - 7,35)} = -1333,33 \frac{Ns}{m}$$

O valor da inclinação  $m$  corresponde a um ganho para o entreferro de 20 mm. Se o entreferro for diferente, a equação (2.19) deverá ser aplicada para as curvas da figura 2.13. Então, de forma similar, fazendo o cálculo para todas as curvas da figura 2.13, tem-se:

Tabela 2.5. Ganhos para diferentes entreferros (para 25 Hz e 420 Vac).

Entreferro [mm]	Ganho [Ns/m]
20	1333,33
16	1600,00
12	1846,15
8	2181,82

O diagrama da Figura 2.18 representa o controle proposto, onde se pode observar que a velocidade e a frequência de referência são sinais de entrada para o bloco Inversor/Motor, resultando na força de tração do motor linear. Esta tração é dividida pela massa do módulo e somada com a força de elasticidade dividida pela massa do módulo, resultando na aceleração para cada módulo unitário.

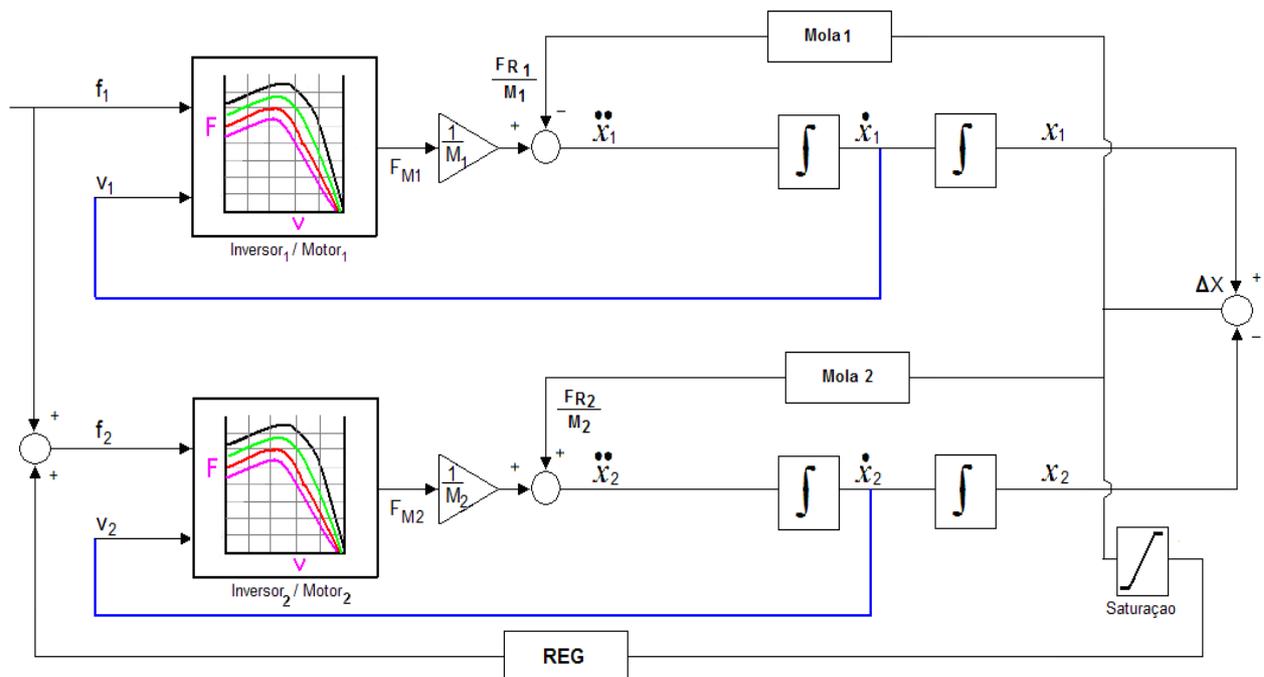


Figura. 2.18. Diagrama de controle para a operação sincronizada de dois veículos do MagLev-Cobra.

A aceleração do módulo é integrada uma vez para obter a velocidade que realimenta o bloco inversor/motor e é integrada novamente para obter a posição de cada um dos módulos unitários. A diferença das posições resulta no alongamento ou encurtamento da mola que, por sua vez, é limitada pelas características mecânicas da mola.

A frequência do módulo 1 é controlada por um operador (frequência de referência).

A frequência de alimentação do segundo módulo é obtida somando-se a frequência de referência do primeiro módulo com o sinal proveniente de um regulador, cuja entrada é a diferença de posição entre os módulos. Este procedimento se assemelha ao controle de potência entre duas áreas interligadas de um sistema de geração de energia. [6].

A força de elasticidade calcula-se multiplicado  $\Delta x$  pela constante de elasticidade  $K$ . Quando  $\Delta x$  atingir os seus valores máximo ou mínimo, ela comporta-se como se tive-se uma constante de elasticidade praticamente infinita. Assim, o bloco mola representa-se na figura 2.19.

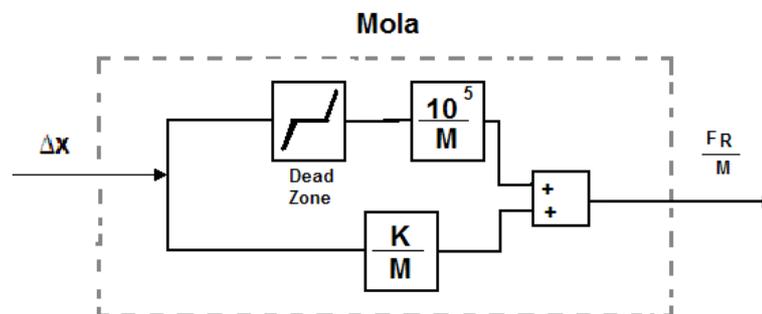


Figura. 2.19. Bloco Mola.

## 2.4 CASOS CRÍTICOS.

O controle proposto pretende abranger os 3 casos mais críticos na operação do MagLev-Cobra. Cada um deles tem uma pequena modificação no controle. Em todos os casos, o veículo parte do repouso, acelera a  $1,5\text{m/s}^2$  até atingir a velocidade de cruzeiro, viaja nesta condição e depois desacelera a  $1,5\text{m/s}^2$  até atingir novamente o repouso. Com isto pretende-se simular a operação real do trem movendo-se de uma estação a outra.

#### 2.4.1. CASO 1 TRAJETÓRIA PLANA E MASSAS CONSTANTES.

Para este caso, tomou-se em conta que os módulos atingem sua capacidade máxima (1500 kg, aproximadamente 10 passageiros) e mínima de peso (500 kg, peso do veículo, não possui passageiros).

Para estes valores de massa de (500 e 1500 kg) se interpolaram os dados da tabela 2.3. A tabela 2.6 mostra os gaps obtidos na interpolação.

Tabela 2.6. Valores de Gap interpolados para o módulo unitário.

Gap [mm]	Força [N]	Massa [kg]
13,70	5000	500
5,00	15000	1500

Para obter os ganhos para as massas de 500 e 1500 kg, se interpolaram os dados das tabelas 2.1 e 2.5. Os ganhos interpolados para os gaps de 13,70 e 5,24 mm podem ser observados na tabela 2.7.

Tabela 2.7. Ganhos interpolados, para entreferros de 13.70 e 5,24 mm (25 Hz).

Massa [kg]	Gap [mm]	Entreferro [mm]	Ganho [Ns/m]
500	13,70	8,30	2157
1500	5,00	17,00	1549

#### 2.4.2. CASO 2 TRAJETÓRIA PLANA E VARIAÇÃO DE MASSA.

Neste caso, tem-se um sinal de frequência variável igual ao do caso anterior, porém considera-se que a massa varia e o gap varia em função da massa. O objetivo é simular a operação real do veículo quando têm passageiros caminhando dentro do trem, movendo-se de um módulo a outro, e admitindo que o trem tem velocidade nominal. Tomou-se em conta o caso mais complicado, onde um dos módulos atingiu a capacidade máxima (1500 kg) e o outro módulo não possui passageiros (500 kg).

Durante a simulação, após se atingir a velocidade nominal, os passageiros passam do módulo cheio para o módulo vazio. Neste caso, a massa é uma função degrau, que

vai de 1500 a 500 kg no módulo que estava cheio, e de 500 a 1500 kg no módulo que estava vazio. Para esse caso o bloco Gap<sub>m</sub> possui uma função para calcular o ganho que está em função da massa (lookup table). A função proposta é mostrada na figura 2.20.:

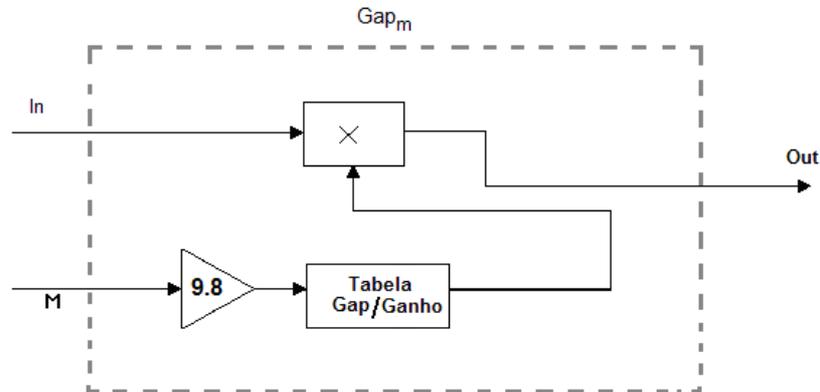


Figura. 2.20. Bloco Gap variável.

Observa-se que uma das entradas do bloco é uma função da massa que varia no tempo. A massa é multiplicada pelo valor da gravidade  $10 \text{ m/s}^2$  e depois esse valor passa para a tabela Gap/Ganho, onde se calcula o ganho, que está em função do entreferro, que a sua vez esta em função do gap que depende da massa. Finalmente, o valor calculado na tabela Gap/Ganho é multiplicado pela entrada (diferença entre frequência e velocidade) e dá como resultado a força de tração do motor linear.

### 2.4.3. CASO 3 TRAJETÓRIA INCLINADA E VARIAÇÃO DE MASSA.

Neste caso, considera-se que o trem opera sobre um plano inclinado. Depois que atinge sua velocidade nominal, considerou-se o movimento dos passageiros, movendo-se de um módulo a outro. Pode-se observar que sobre cada módulo unitário existem três forças: a força de tração, a força elástica e o peso do módulo. O seguinte diagrama de controle, mostrado na figura 2.21, representa este caso.

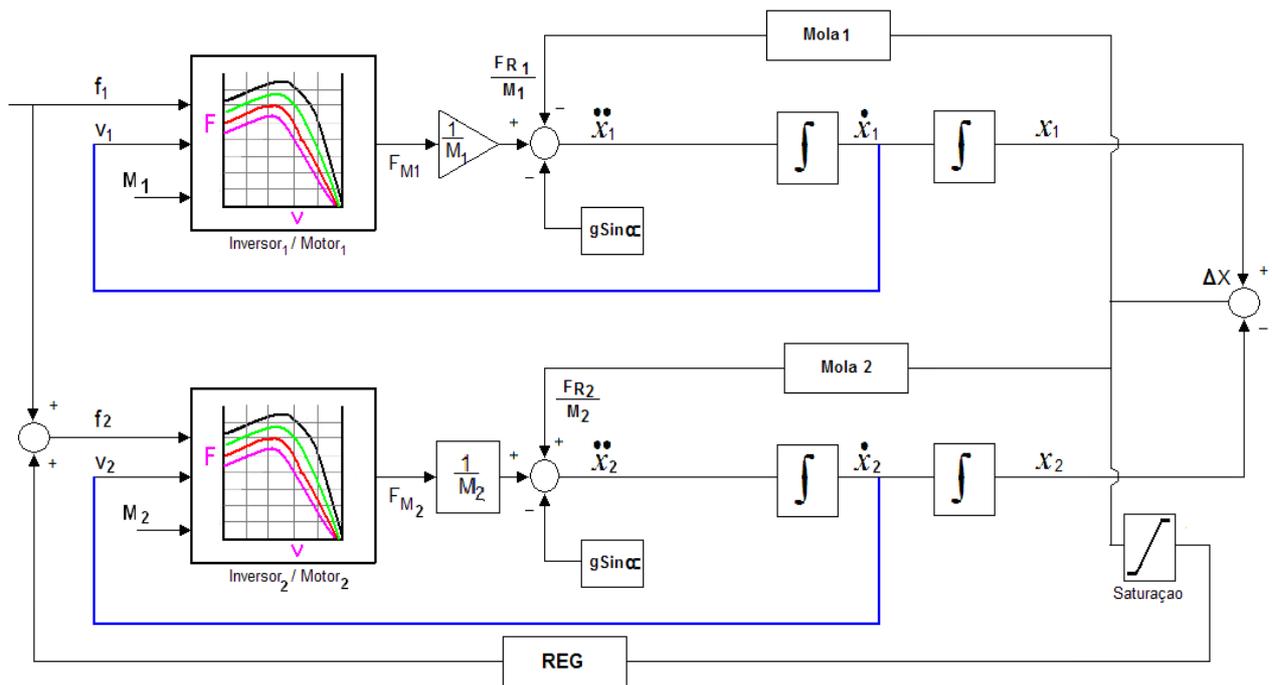


Figura. 2.21. Diagrama de controle para a operação sincronizada de dois veículos do MagLev-Cobra em um plano inclinado.

## 2.5 ABORDAGEM ANALÍTICA.

Para esta análise não se tomaram em conta as saturações. Na figura 2.22 mostra-se o diagrama de blocos sem saturações.

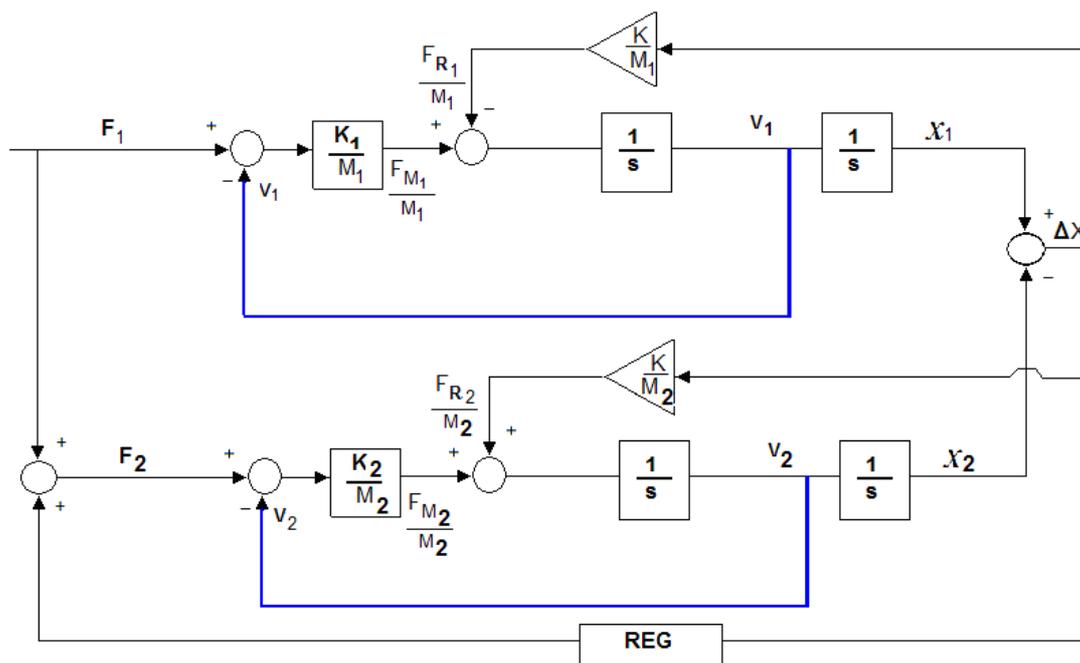


Figura. 2.22. Diagrama de controle sem saturações.

Nota: REG representa um ganho.

A partir daí, para o módulo 1, tem-se:

Força de tração:

$$F_{M1} = (F_1 - V_1)K_1 \text{ Eq. (2.20)}$$

Velocidade:

$$V_1 = \frac{1}{M_1 s} [(F_1 - V_1)K_1 - K\Delta X] \text{ Eq. (2.21)}$$

Posição:

$$X_1 = \frac{1}{M_1 s^2} [(F_1 - V_1)K_1 - K\Delta X] \text{ Eq. (2.22)}$$

Para o módulo 2, tem-se a força de tração, a velocidade e a posição, respectivamente:

$$F_{M2} = (F_2 - V_2)K_2 \text{ Eq. (2.23)}$$

$$V_2 = \frac{1}{M_2 s} [(F_2 - V_2)K_2 - K\Delta X] \text{ Eq. (2.24)}$$

$$X_2 = \frac{1}{M_2 s^2} [(F_2 - V_2)K_2 - K\Delta X] \text{ Eq. (2.25)}$$

De (2.22),(2.23) e (2.24), resulta:

$$X_1 = \frac{F_1 K_1 - K\Delta X}{s[M_1 s + K_1]} \text{ Eq. (2.26)}$$

De (2.25),(2.26) e (2.27), resulta:

$$X_2 = \frac{F_2 K_2 - K\Delta X}{s[M_2 s + K_2]} \text{ Eq. (2.27)}$$

Subtraindo as equações (2.25) e (2.26) para obter  $\Delta X = X_1 - X_2$  e considerando que a frequência de alimentação do segundo módulo é dada por:

$$F_2 = F_1 + REG\Delta X \text{ Eq. (2.28)}$$

Resulta:

$$\Delta X = \frac{F_1 K_1}{s[M_1 s + K_1]} - \frac{F_1 K_2}{s[M_2 s + K_2]} - \frac{K.\Delta X}{s[M_1 s + K_1]} - \frac{K.\Delta X}{s[M_2 s + K_2]} - \frac{K_2 REG.\Delta X}{s[M_2 s + K_2]}$$

Eq. (2.29)

$$\frac{\Delta X(s)}{F_1(s)} = \frac{(K_1 M_2 - K_2 M_1)s}{s(M_1 s + K_1)(M_2 s + K_2) + K[(M_1 + M_2)s + (K_1 + K_2)] + K_2 REG(M_1 s + K_1)} = \frac{N(s)}{D(s)}$$

Eq. (2.30)

A dinâmica do sistema pode ser analisada a partir das raízes de  $D(s) = 0$ . O problema fica de mais fácil trato arrumando como um problema de Lugar das Raízes, na forma  $1 + REG \cdot G(s) = 0$ . Assim:

$$1 + REG \frac{K_2 (M_1 s + K_1)}{s(M_1 s + K_1)(M_2 s + K_2) + K[(M_1 + M_2)s + (K_1 + K_2)]} = 0$$

Eq (2.31)

ou

$$1 + REG \frac{K_2 (M_1 s + K_1)}{M_1 M_2 s^3 + [M_1 K_2 M_2 K_1] s^2 + [K_1 K_2 + K(M_1 + M_2)] s + K(K_1 + K_2)} = 0$$

Eq (2.32)

Tomando com exemplo o caso de  $M_1=500\text{kg}$ ,  $M_2=1500\text{kg}$ ;  $K_1=K_2=1600\text{ Ns/m}$  e  $K=100\text{ N/m}$  tem-se:

$$G(s) = \frac{16(5s + 16)}{75s^3 + 320s^2 + 276s + 36}$$

O Lugar das Raízes encontra-se representado na figura 2.23:

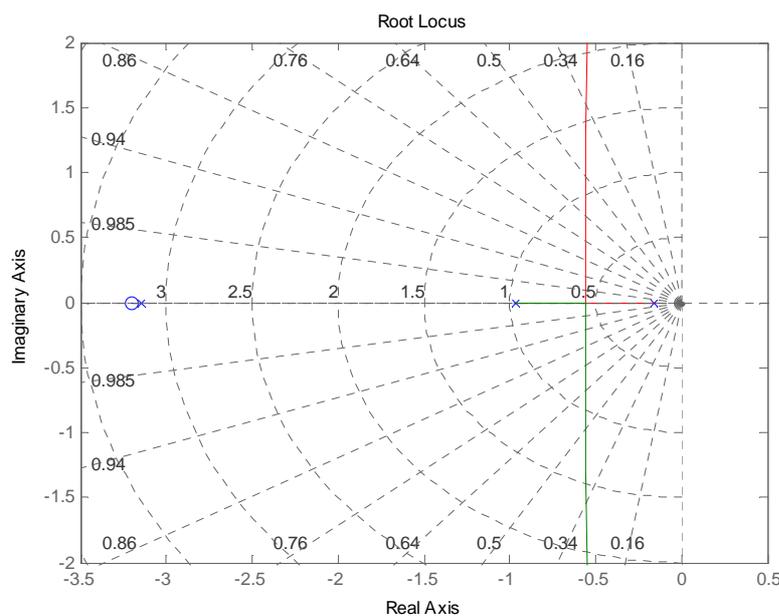


Figura. 2.23. Lugar das Raízes.

Verifica-se que um regulador proporcional garantiria a operação estável do sistema proposto. No entanto, na prática, as limitações impostas ao comprimento da interconexão, que possui alongamentos máximos e mínimos, bem como a limitação no escorregamento do motor linear, restringem a análise linear para pequenas variações. Por isto, optou-se por um estudo de simulação, considerando as não linearidades, a ser apresentado no capítulo 4.

## **2.6 CONCLUSÕES.**

O controle proposto na figura 2.21 é uma forma geral e abrange todos os casos, podendo ser particularizado para cada caso específico.

Os casos mais críticos foram escolhidos para observar o comportamento do veículo de levitação magnética na operação.

Os valores utilizados nos blocos de saturação foram os mesmos em todos os casos devido às limitações de informação das características do motor linear para cada *gap*.

A implementação do controle proposto precisa de um operador que fornece a referência de velocidade desejada. Portanto, não se trata de um esquema adequado para operação de um APM (Automated People Mover).

## Capítulo 3

### Dados experimentais do motor linear

#### 3.1 INTRODUÇÃO.

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios experimentais para obter as curvas características do motor linear.

#### 3.2 DADOS DO MOTOR LINEAR.

O motor linear de primário curto tem os seguintes dados de placa:

Tabela 3.1. Características do Motor Linear. [4]

DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	Motor Linear
FABRICANTE	Equacional
MODELO	EALP - 1000 / 6
FORÇA	900 N
TENSÃO PRIMÁRIA	420 V - Y
CORRENTE PRIMÁRIA	53 A
FREQÜÊNCIA	25 Hz
Nº DE PÓLOS	6
VELOCIDADE	7.8 m/s
REGIME	1 Hora
CLASSE DE ISOLAÇÃO	H
PROTEÇÃO	IP 00

#### 3.3 CALIBRAÇÃO DO INDICADOR DE PESAGEM.

A calibração do indicador de pesagem foi importante para obter medições precisas. Esta foi feita a partir de um conhecido peso de referência, como indica o manual de calibração [7]. Utilizou-se como padrão para o indicador de passagem um peso de 11 kg, como se vê na figura 3.1. O valor foi testado para a tração e a compressão da célula de carga.



Figura 3.1. Calibração do indicador de pesagem, Peso = 11 kg.



Figura 3.2. Indicador de pesagem.

Este peso padrão serve tanto para as medições no eixo horizontal como no eixo vertical. O indicador de pesagem foi calibrado no eixo vertical, como se mostra na figura 3.1.

### 3.4 MONTAGEM DA CÉLULA DE CARGA.

O objetivo dos ensaios é determinar a força de tração exercida pelo motor linear. Utilizou-se uma célula de carga, modelo ZX-500 da Alfa Instruments [8], para medir a força de tração. A célula de carga foi fixada mecanicamente na bancada de teste e na outra extremidade foi fixada num lado do motor linear, por meio de um cabo de aço, como pode ser visto na figura 3.3.

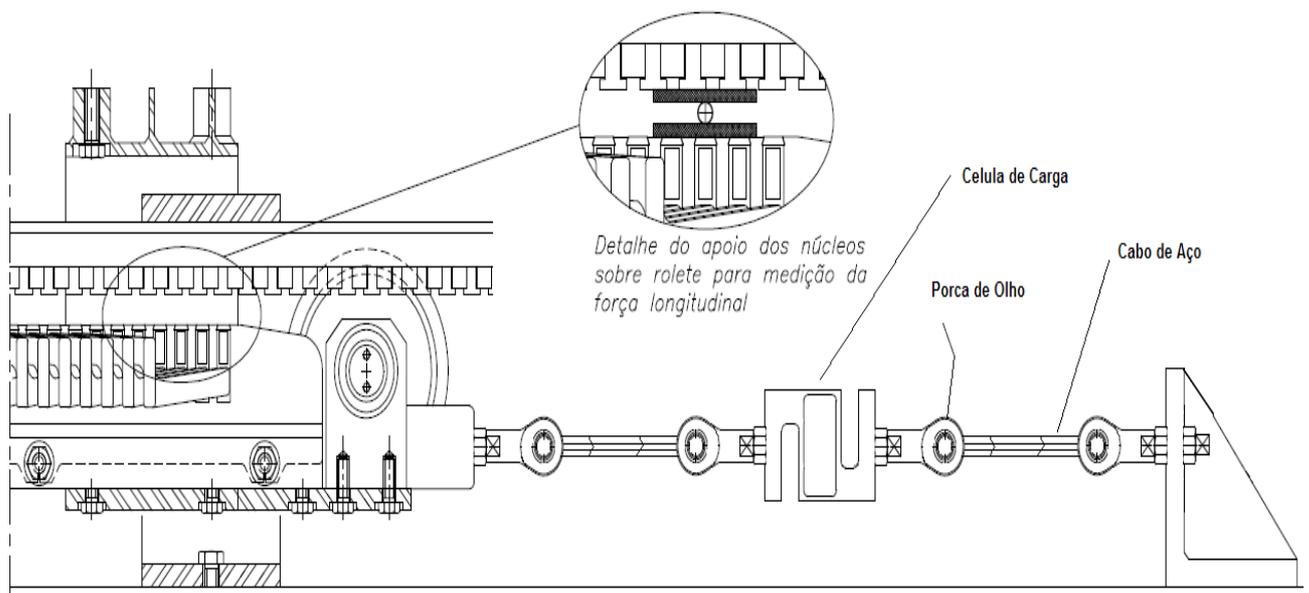
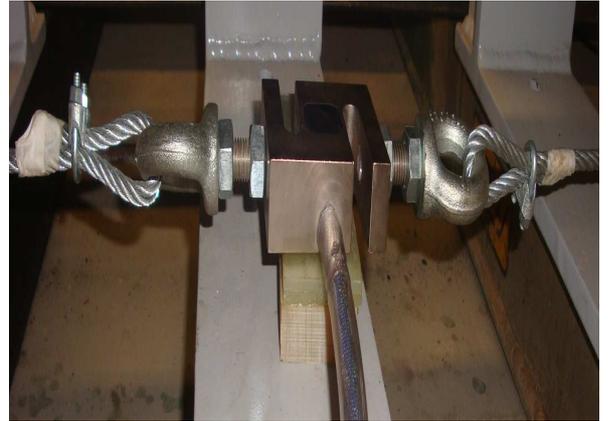


Figura 3.3. Arranjo mecânico para os ensaios.

O arranjo mecânico mostrado na figura 3.3 foi implementado para os ensaios de rotor bloqueado, como é mostrado na figura 3.4.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 3.4. a) Conexão mecânica da célula de carga.

b) Conexão mecânica da célula de carga, vista de perto.

c) Conexão mecânica da célula de carga, lado do motor.

d) Conexão mecânica da célula de carga, lado do ponto fixo.

e) Conexão da célula de carga, lado do ponto fixo detalhe de arranjo mecânico.

Como o entreferro foi diferente em cada teste, fabricou-se uma peça mecânica, mostrada na Figura 3.4 (e), que permite variar a posição no ponto de apoio fixo.

A célula de carga está conectada ao indicador de pesagem, que internamente tem uma placa de aquisição de dados e um circuito amplificador, o qual inclui uma função de comunicação com um CLP [7]. A função CLP permite enviar os dados diretamente para o inversor ou PC.



Figura 3.5. Circuito amplificador e placa de aquisição de dados.

A força de tração ou compressão na célula de carga [8] é mostrada na tela do indicador de pesagem (figura 3.2).

A figura 3.3 mostra que o entreferro foi obtido por meio de calços isolantes, colocados nas superfícies do primário e secundário, e entre os mesmos foi colocado um rolete de material não magnético. Desse modo, os calços isolantes ficam em contato com os respectivos núcleos, mas a interface entre eles é um elemento rolante, de modo que não apresenta nenhuma restrição ao movimento longitudinal, permitindo que toda a força nessa direção seja transferida ao elemento medidor. Neste trabalho, foi utilizada uma barra redonda de latão de 4,8 mm de diâmetro e comprimento de 20mm. As placas isolantes eram de espessura de 1,6; 3,6; 5,6 e 7,6 mm cada uma, para os respectivos entreferros (8;12;16;20 mm). Para todos os entreferros, foi mantida a barra redonda original e foram sendo aumentados os calços de cada lado.

Foram utilizados quatro conjuntos de calços e barras distribuídos ao longo do comprimento do primário.



a)

Figura 3.6. a) Placas para limitar o entreferro. Vista superior.



b)

b) Placas para limitar o entreferro. Vista lateral.

As placas foram colocadas entre o primário e o secundário como se vê na figura 3.7.

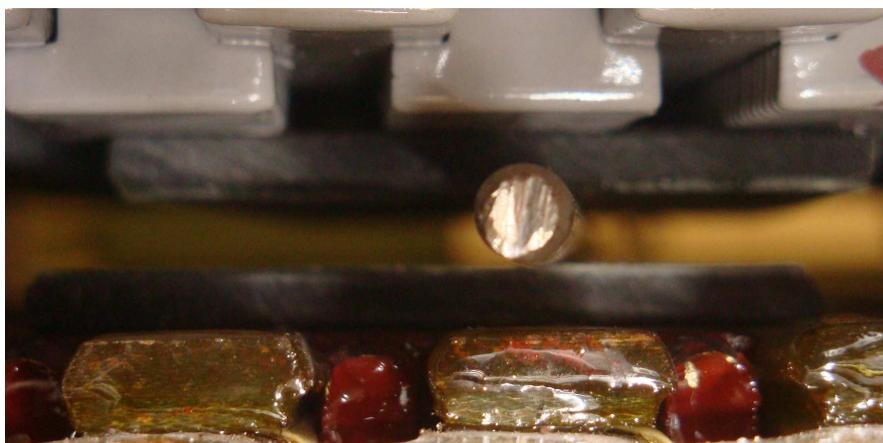


Figura 3.7. Conjunto de calços isolantes e barra, gap de 12 mm.

Para ter um gap constante em todo o motor, os calços foram colocados equidistantes um de outro, como indicado na figura 3.8.



Figura 3.8. Calços e barras no largo do primário do motor linear.

Depois de colocar os calços, o primário do motor foi levantado com ajuda de uma ponte grua, até ajustar os calços e obter os entreferros desejados. Ver figura 3.9.



a)



b)



c)

Figura 3.9. a) Motor linear segurado pela ponte grua. Vista lateral.

b) Motor linear segurado pela ponte grua. Vista do lado contrário.

c) Equipamentos para o ensaio de rotor bloqueado.

### 3.5 ENSAIOS.

O levantamento da curva força x escorregamento foi realizado fazendo a ensaio de rotor bloqueado [9], impondo diferentes frequências por meio do inversor CFW-11.

As frequências de referência usadas foram de 25, 20, 15,10 e 5 Hz. Os valores de força foram obtidos através de testes com os gaps de 8, 12, 16 e 20 mm, como pode ser observado na tabela 3.2. O inversor foi programado para cada uma das frequências e tensões desejadas [10].

#### 3.5.1 Entreferro = 8mm.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 3.2: frequência

Tabela 3.2. Valores medidos para entreferro = 8 mm.

Entreferro = 8 mm		Valores Medidos					
		Testes Laboratório			Dados Relatório Equacional		
Frequência (Hz)	Escorregamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Força (Kgf)	Corrente (A)	Tensão (V)	Força (Kgf)
25	1	101.2	385	260	102.8	385	266
20	0.8	93.8	305	259.5	93	305	266
15.8	0.632	85.5	240	255.8	83.6	239	255.5
10	0.4	75.8	169	274	73.9	169	261

Os gráficos com os valores medidos são os seguintes:

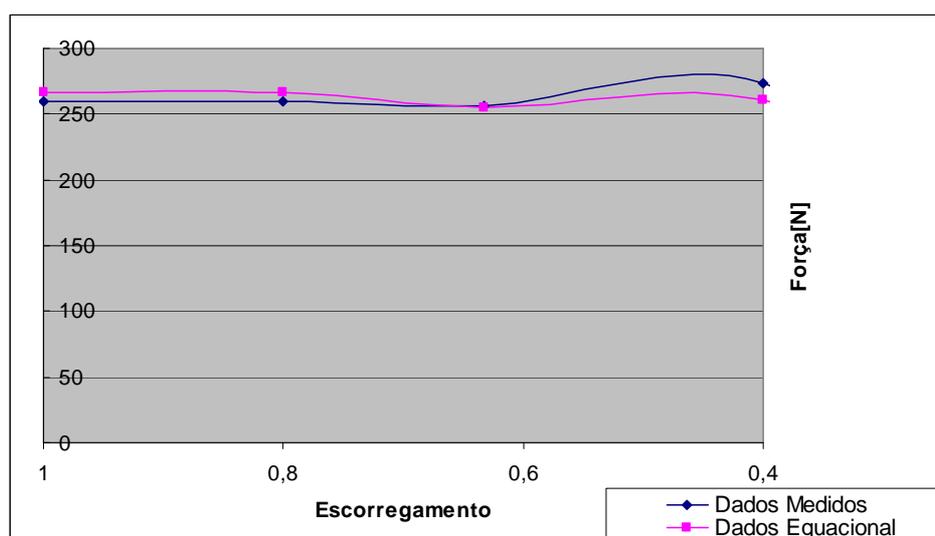


Figura 3.10. Força / Escorregamento, Gap = 8 mm.

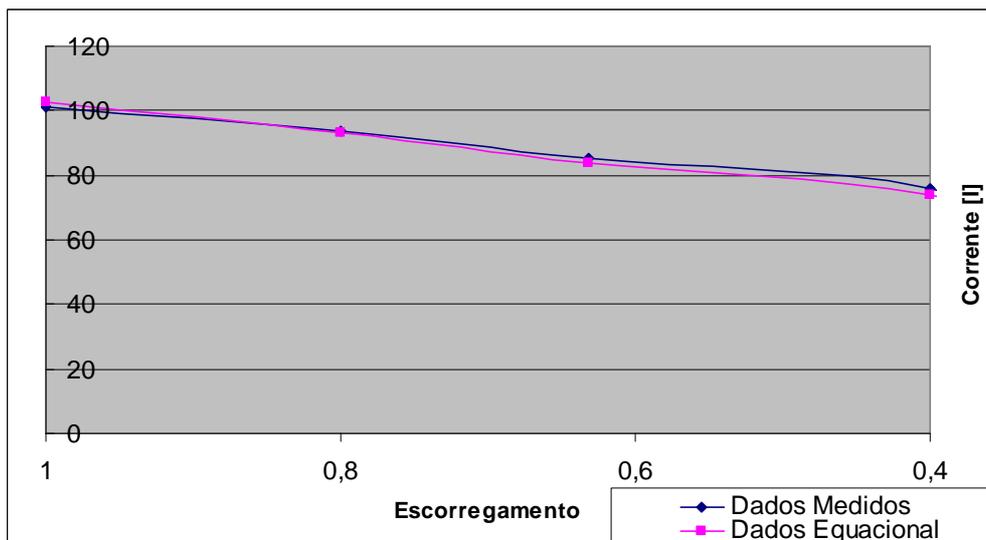


Figura 3.11. Corrente / Escorregamento, Gap = 8 mm.

Nota: O valor medido de força para a frequência de 5 Hz não foi plotado por que as características do inversor permitem chegar no máximo à tensão de 74 V.

### 3.5.2 Entreferro = 12mm.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 3.3:

Tabela 3.3. Valores medidos para entreferro = 12 mm.

Entreferro = 12 mm		Valores Medidos					
		Testes Laboratório			Dados Relatório Equacional		
Frequência (Hz)	Es corregamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Força (Kgf)	Corrente (A)	Tensão (V)	Força (Kgf)
25	1	101	368	200	101	363	200
20	0,8	84,6	262	157	83	262	165,6
15,4	0,6	79,6	206	170	78	206	171
10	0,4	64,8	133	149,7	62,4	132	143
5	0,2	49,5	72	103	48,6	73	109

Os gráficos com os valores medidos são os seguintes:

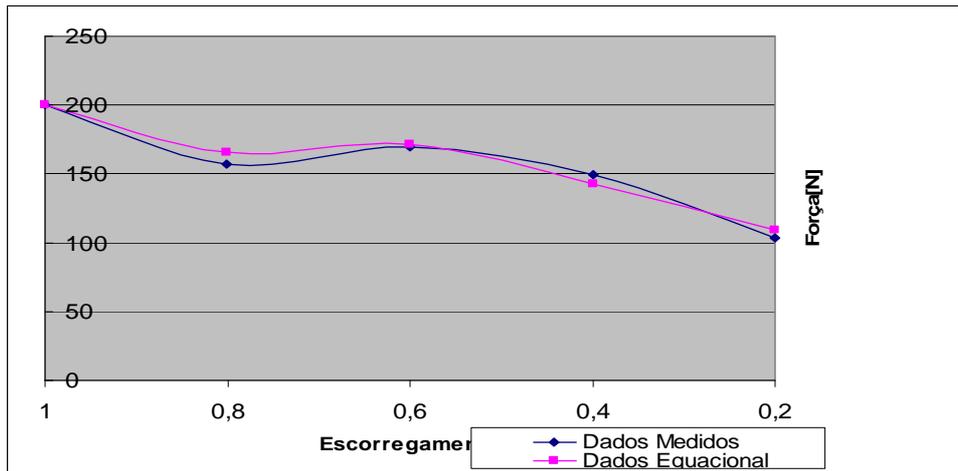


Figura 3.12. Força / Escorregamento, Gap = 12 mm.

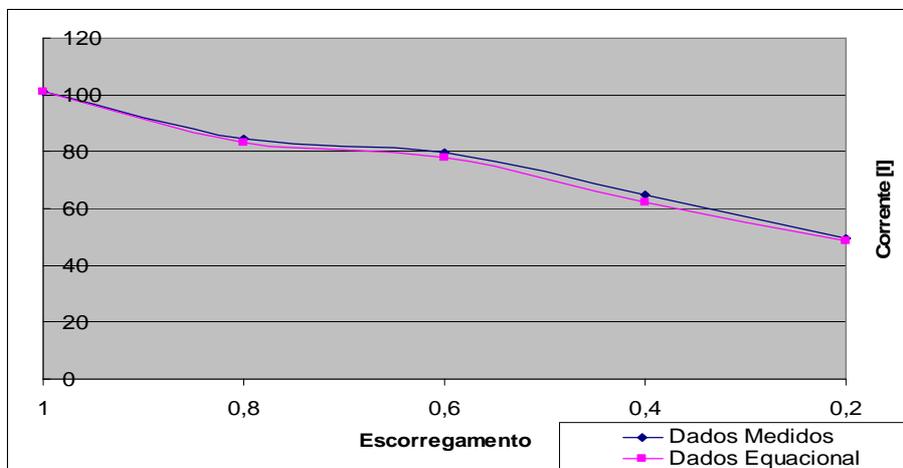


Figura 3.13. Corrente / Escorregamento, Gap = 12 mm.

### 3.5.3 Entreferro = 16mm.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 3.4:

Tabela 3.4. Valores medidos para entreferro = 16 mm.

Entreferro = 16 mm		Valores Medidos					
		Testes Laboratório			Dados Relatório Equacional		
Frequência (Hz)	Es corregam ento	Corrente (A)	Tensão (V)	Força (Kgf)	Corrente (A)	Tensão (V)	Força (Kgf)
25	1	101.3	364	161.7	102	363	172.5
20	0.8	80.5	246	122.6	80	246	127.5
15	0.6	68.9	174	111	70.5	174	111.5
10	0.4	60.6	121	107.8	62.3	122	112
5	0.2	46.5	63	71.1	44.5	63	68

Os gráficos com os valores ajustados são os seguintes:

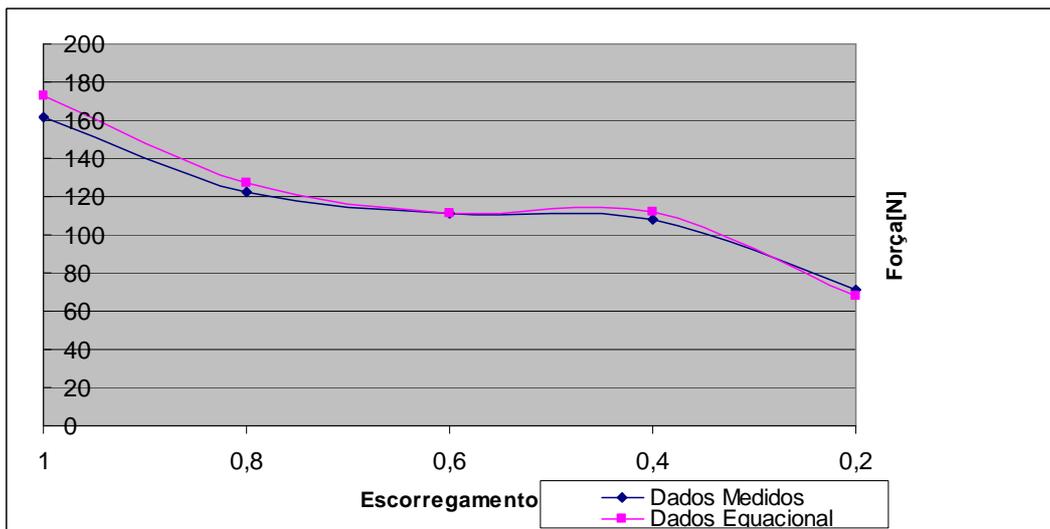


Figura 3.14. Força / Escorregamento, Gap = 16 mm.

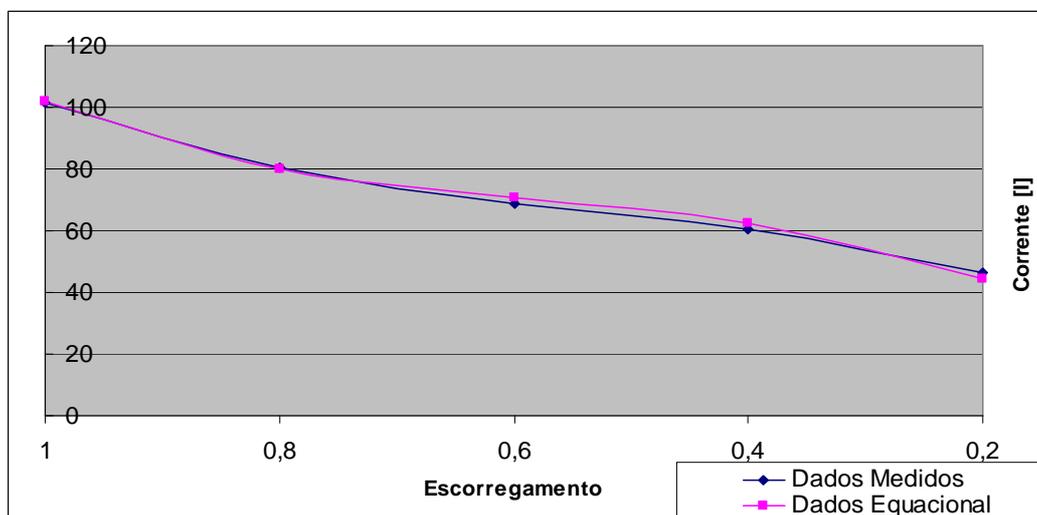


Figura 3.15. Corrente / Escorregamento, Gap = 16 mm.

### 3.5.4 Entreferro = 20mm.

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 3.5:

Tabela 3.5. Valores medidos para entreferro = 20 mm.

Entreferro = 20 mm		Valores Medidos					
		Testes Laboratório			Dados Relatório Equacional		
Frequência (Hz)	Escorregamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Força (Kgf)	Corrente (A)	Tensão (V)	Força (Kgf)
25	1	93.5	343	122	97.9	344	122.5
22.6	0.904	91.8	303	117.5	93.5	302	120.5
20	0.8	79.2	239	95.6	79	240	99.5
17.6	0.704	82	225	110.5	81.4	225	113
14.9	0.596	76	186	105	77.3	187	108
12.5	0.5	68.6	150	96.5	68.6	149	97
10	0.4	65.4	125	94.4	65.3	126	96
7.4	0.296	57.2	91	76.8	56.6	90	80
5	0.2	55.6	70	67.2	54	70	76

Os valores experimentais apresentados na tabela acima precisam ser ajustados para o nível de tensão de 420V, respeitando o valor de  $V/f$  constante ou, mais precisamente, de fluxo no entreferro constante. O resultado deste ajuste leva aos gráficos da figura 2.13 [4].

Os gráficos com os valores ajustados são os seguintes:

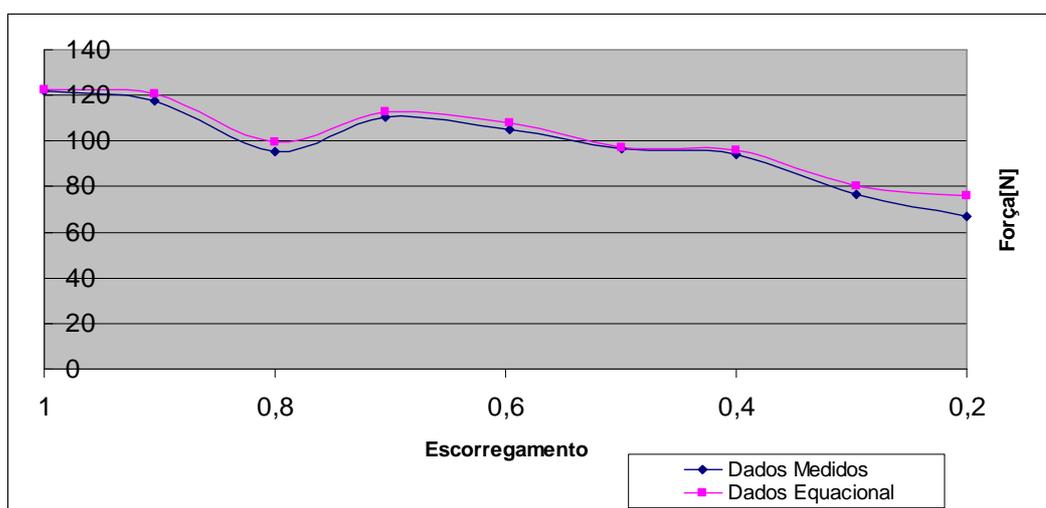


Figura 3.16. Força / Escorregamento, Gap = 20 mm.

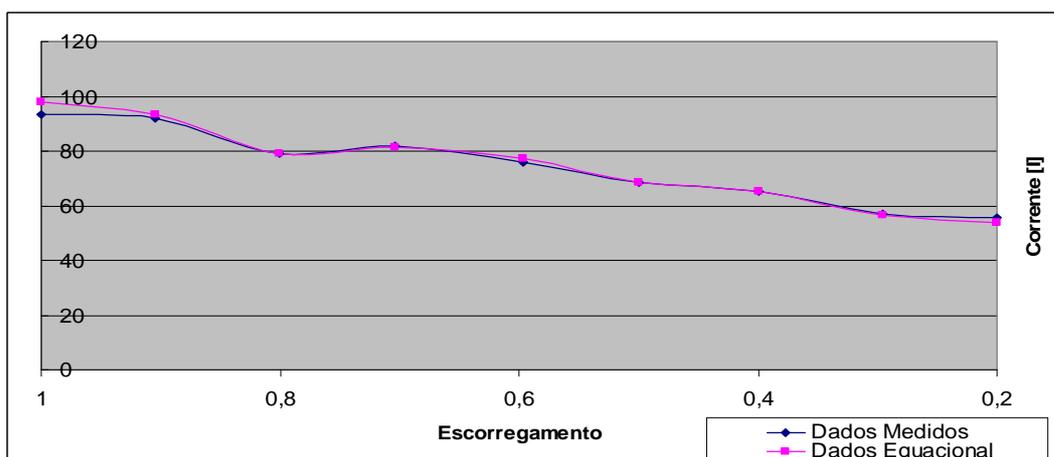


Figura 3.17. Corrente / Escorregamento, Gap = 20 mm.

### 3.6 CONCLUSÕES.

Foram realizados testes de rotor bloqueado para o motor linear e medidos os valores de força para os *entreferos* de 8, 12, 16 e 20 mm. Os dados obtidos estão de acordo com os dados do relatório técnico fornecido pelo fabricante.

A inclusão de um elemento rolante (barra) permite medições com *gap* controlado e deve ser considerado como referência de procedimento para evitar que o primário fique preso ao secundário.

Nos testes com o *entreferro* de 8 mm, se obteve uma força de 126 kg para uma tensão de 74 V e uma frequência de 5 Hz. Não se consegue chegar na tensão de 82 V para a frequência de 5 Hz devido às características de operação do inversor CFW-11.

Os valores experimentais aqui apresentados precisam ser ajustados para o nível de tensão de 420V, respeitando o valor de  $V/f$  constante ou, mais precisamente, de fluxo no entreferro constante. O resultado deste ajuste leva aos gráficos da figura 2.13 [4].

# Capítulo 4

## Simulação

### 4.1 INTRODUÇÃO.

O modelo matemático empregado nas simulações aqui apresentadas foi tratado no capítulo 2. Será considerado um sistema composto por dois módulos unitários interligados por meio de elementos elásticos. Cada módulo tem tração independente por um motor linear.

Os resultados foram simulados com o software Simulink/Matlab [11] considerando desde o caso mais simples até o caso mais complexo. Os valores dos parâmetros também variaram para cada caso.

### 4.2 PARÂMETROS PARA O SISTEMA DE CONTROLE.

O controle proposto para a operação sincronizada de dois módulos do MagLev–Cobra, da figura 2.18., tem os seguintes parâmetros:

M1: Massa do Veículo 1 [kg].

M2: Massa do Veículo 2 [kg].

Gapm1: Entreferro do motor 1 [mm].

Gapm2: Entreferro do motor 2 [mm].

K: Constante de elasticidade do elemento de interligação [N/m<sup>2</sup>].

Frequência: Frequência de referência [Hz].

### 4.3 TESTES DE COM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS.

Foram programados 3 casos considerando as possibilidades mais relevantes na operação do Maglev–Cobra, desde o mais simples até o mais complexo [12], como já descrito no capítulo 2. Em todos os casos considera-se a frequência de referência mostrada na figura 4.1, simulando a aceleração do veículo a 1,5 m/s<sup>2</sup>, seguida de

percurso em velocidade constante e finalmente frenagem. A excursão da borracha de interligação foi limitada em  $\pm 0,20$  m e a velocidade de escorregamento em  $\pm 0,95$  m/s. Estas limitações tornam o sistema não linear favorecendo um estudo por simulação. Para cada caso, são mostrados quatro grupos de curvas: velocidade, força, diferença de posição e frequência de alimentação. Em todos os casos, foram avaliadas quatro constantes de mola:  $K=10$ ,  $K=500$ ,  $K=2500$  e  $K=10^5$  N/m. Além disso, dois reguladores proporcionais foram testados:  $REG=1$  e  $REG=10$ . Com essas simulações, pode-se observar e avaliar o comportamento dos módulos unitários.

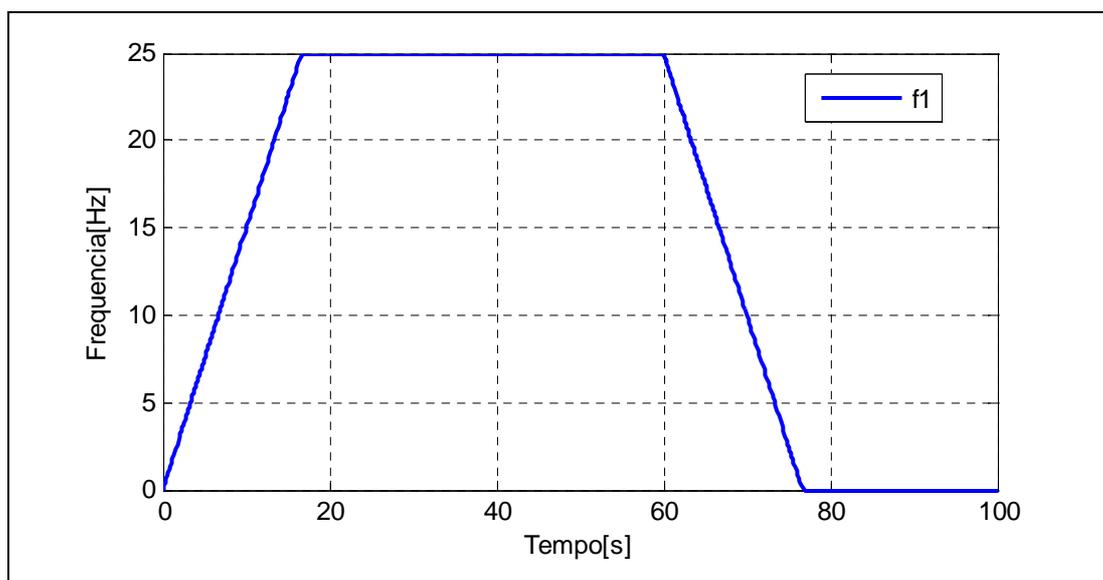


Figura. 4.1. Frequência de referência.

O módulo unitário tem capacidade para 1500 kg (10 pessoas aproximadamente). Considerando que o peso do módulo unitário e do motor linear é de aproximadamente 500 kg, os valores mínimos e máximos da massa são 500 e 1500 kg, respectivamente. Considerou-se que o veículo 1 está na frente em relação ao veículo 2, como mostrado na figura 2.4.

### 4.3.1. CASO 1 TRAJETÓRIA PLANA E MASSAS CONSTANTES.

As condições deste caso foram apresentadas no item 2.4.1. As simulações consideradas estão resumidas na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Parâmetros para a simulação de trajetória plana e massa constante

<b>Caso</b>	<b>M1 [kg]</b>	<b>M2 [kg]</b>	<b>K [N/m]</b>	<b>Ganho1 [Ns/m]</b>	<b>Ganho2 [Ns/m]</b>	<b>Observações</b>
<b>1<sup>a</sup></b>	500	500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	2157	2157	M1 = M2 sem passageiros.
<b>1b</b>	1500	1500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	1549	1549	M1 = M2 com passageiros.
<b>1c</b>	500	1500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	2157	1549	M1 ≠ M2 Módulo 1, sem passageiros.
<b>1d</b>	1500	500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	1549	2157	M1 ≠ M2 Módulo 2, sem passageiros.

Inicialmente, apresentam-se as simulações para um regulador proporcional onde REG=1.

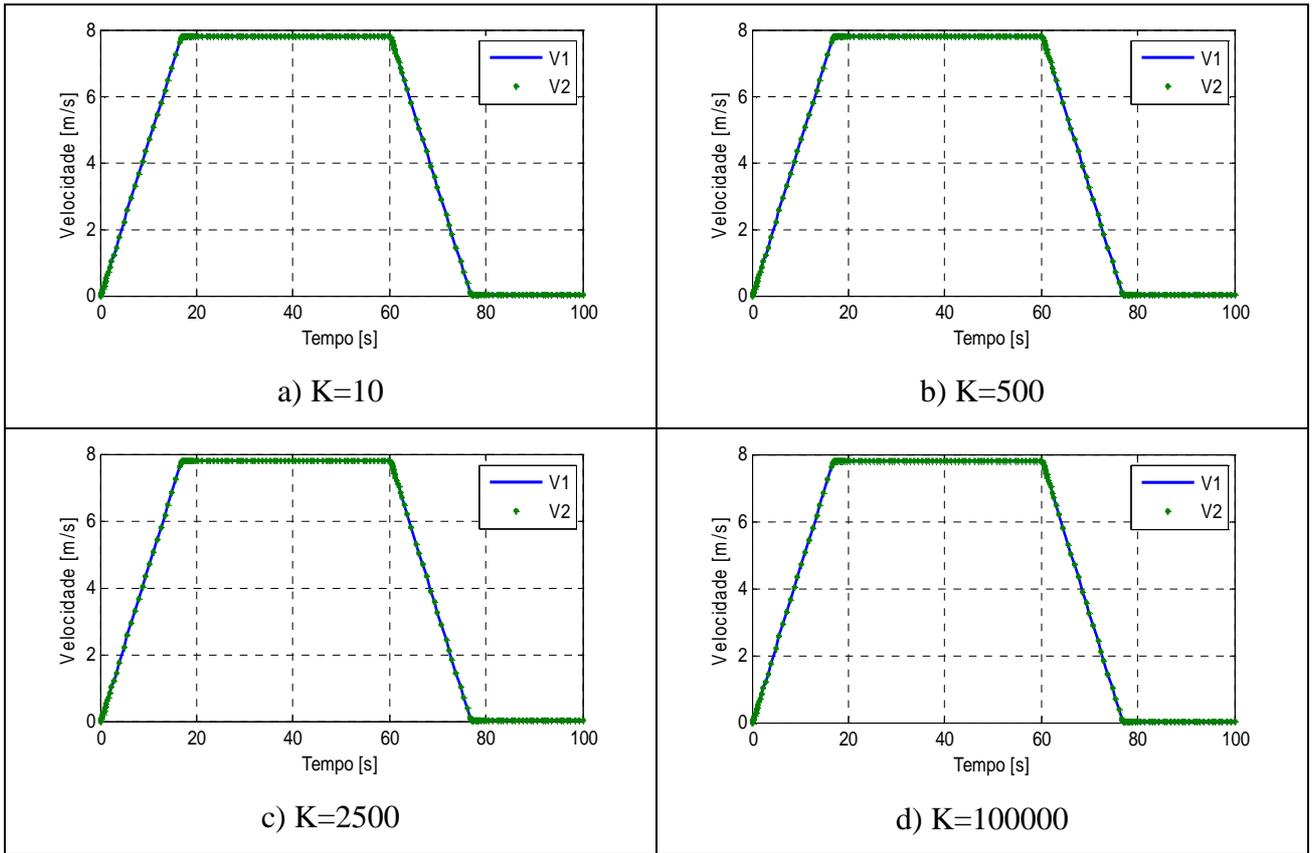


Figura. 4.2. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 a, REG = 1.

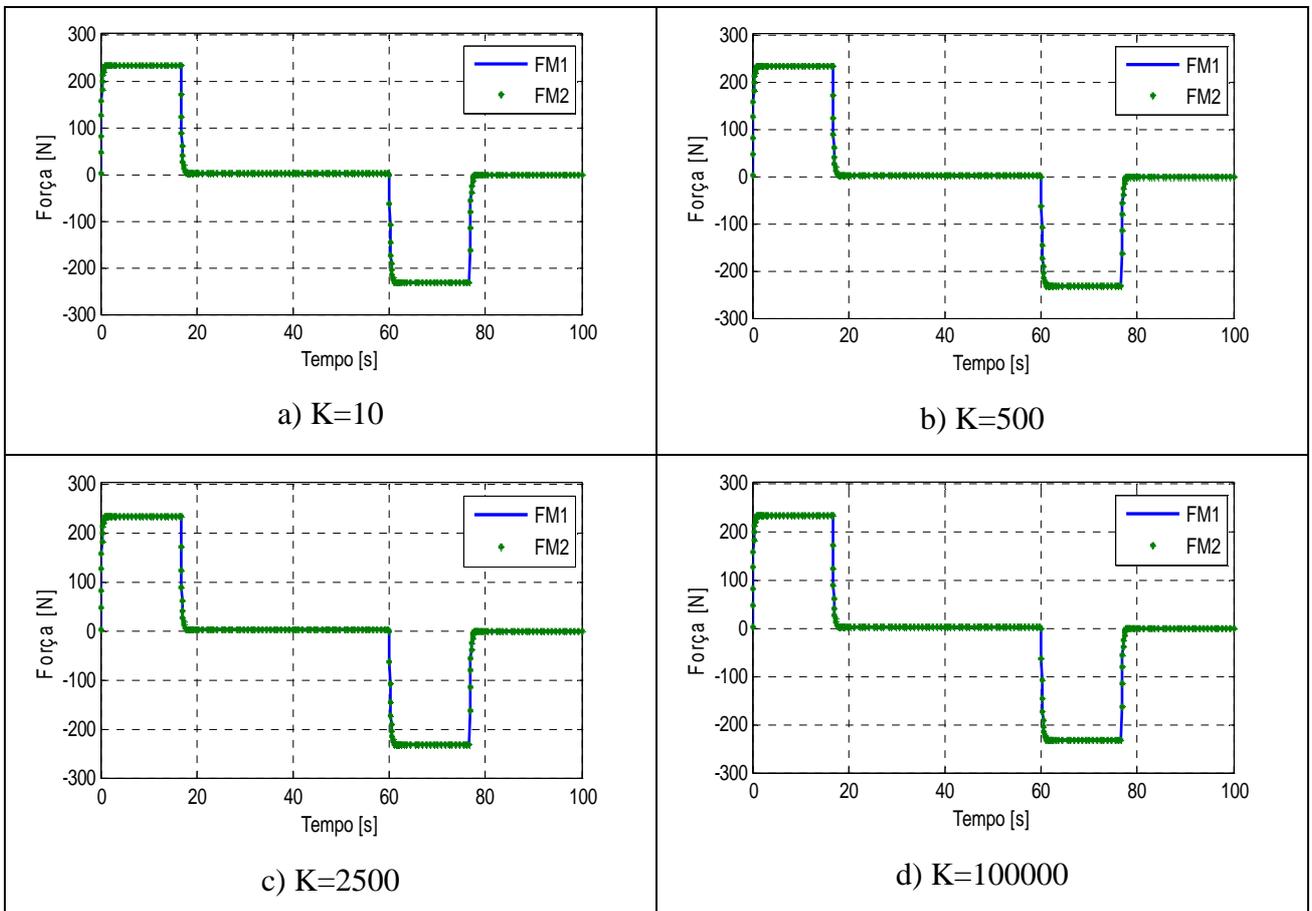


Figura. 4.3. Força 1 e Força 2, Caso 1 a, REG = 1.

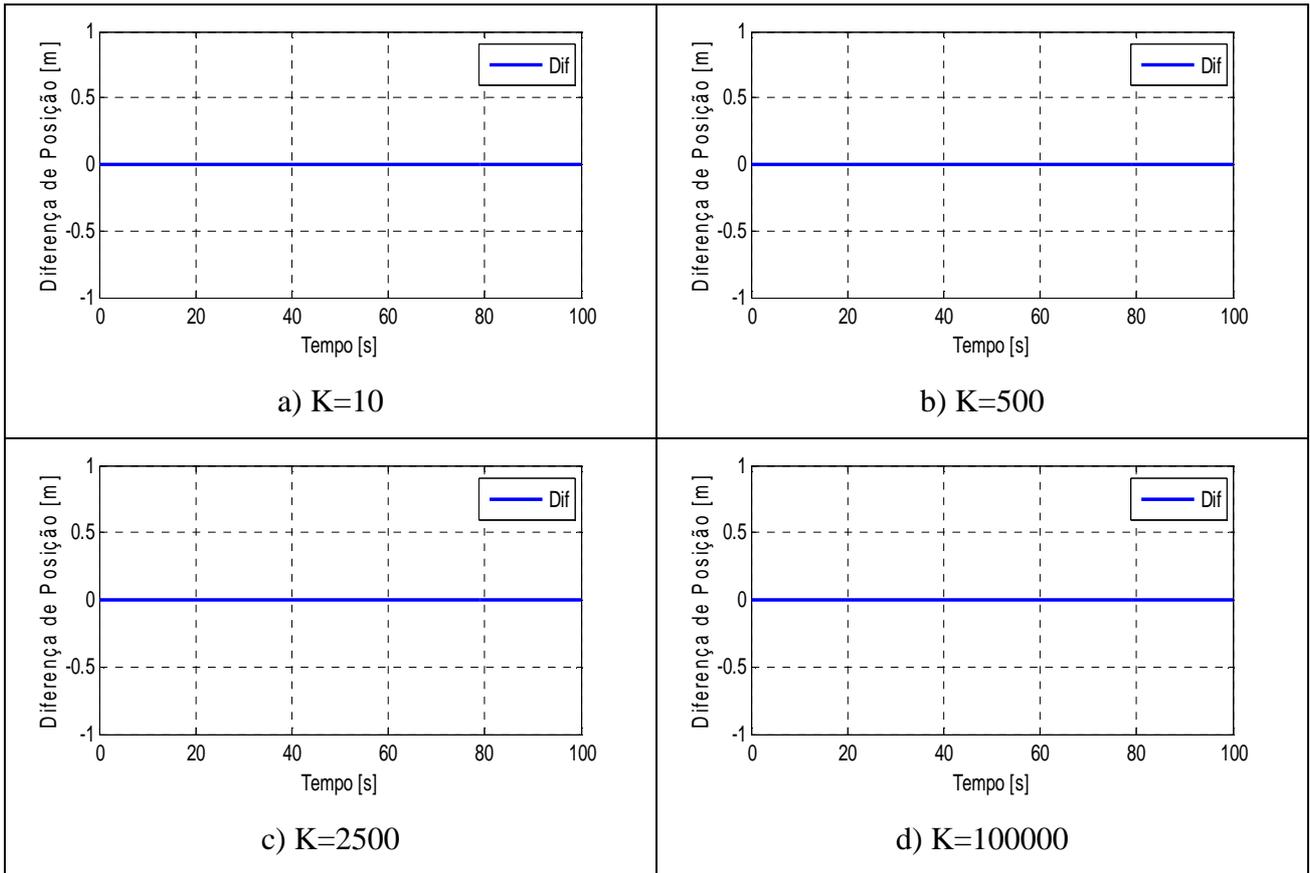


Figura. 4.4. Diferença de posição, Caso 1 a, REG = 1.

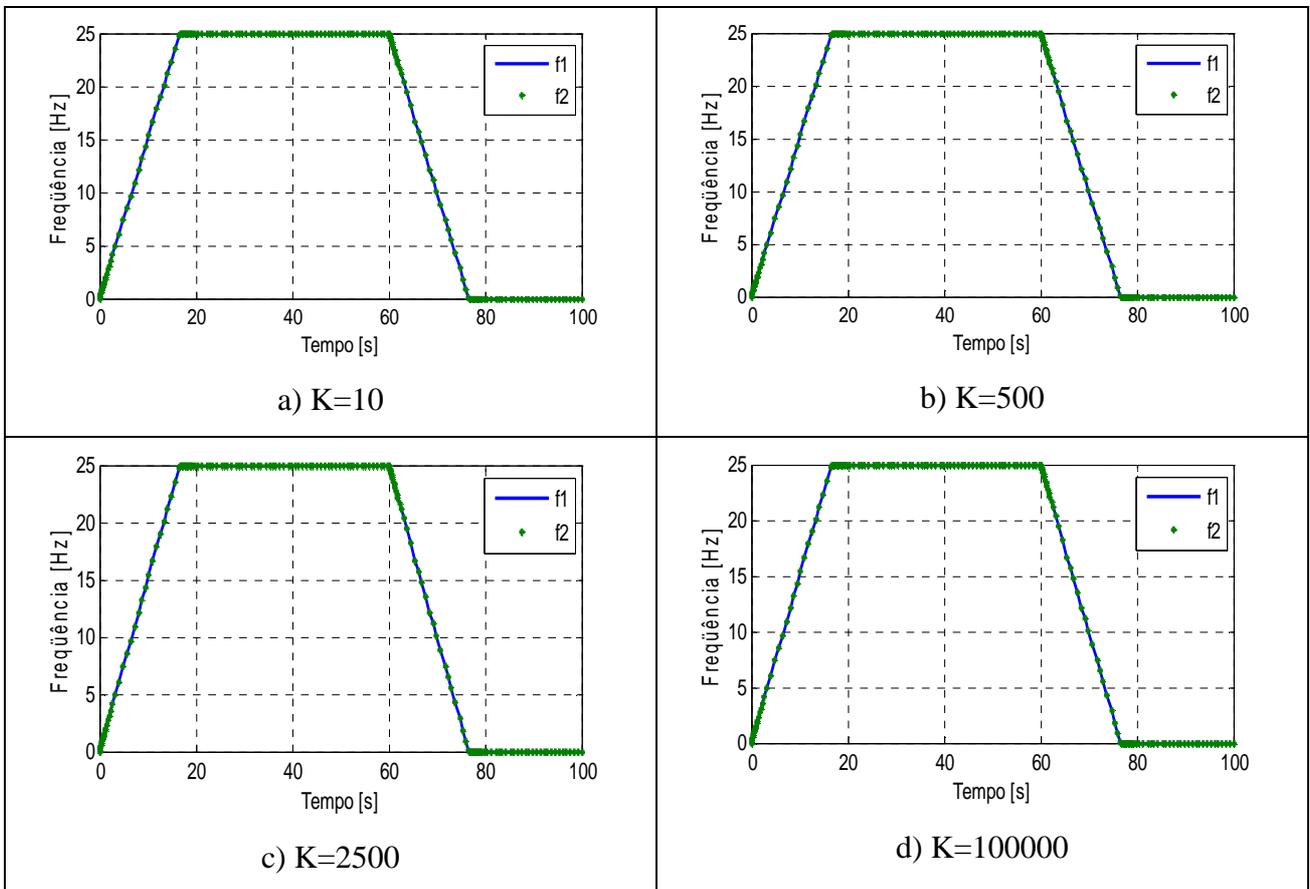


Figura. 4.5. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1 a, REG = 1.

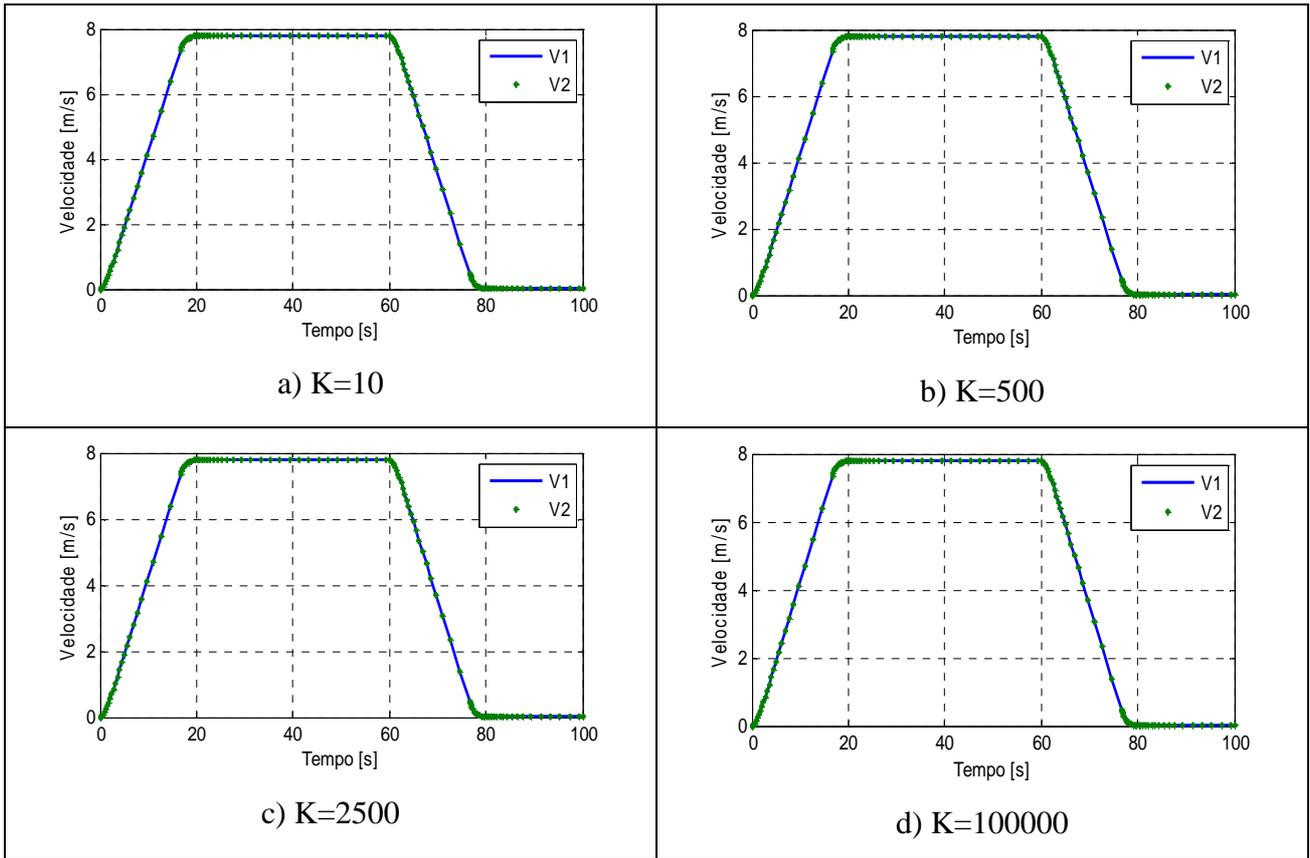


Figura. 4.6. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 b , REG = 1.

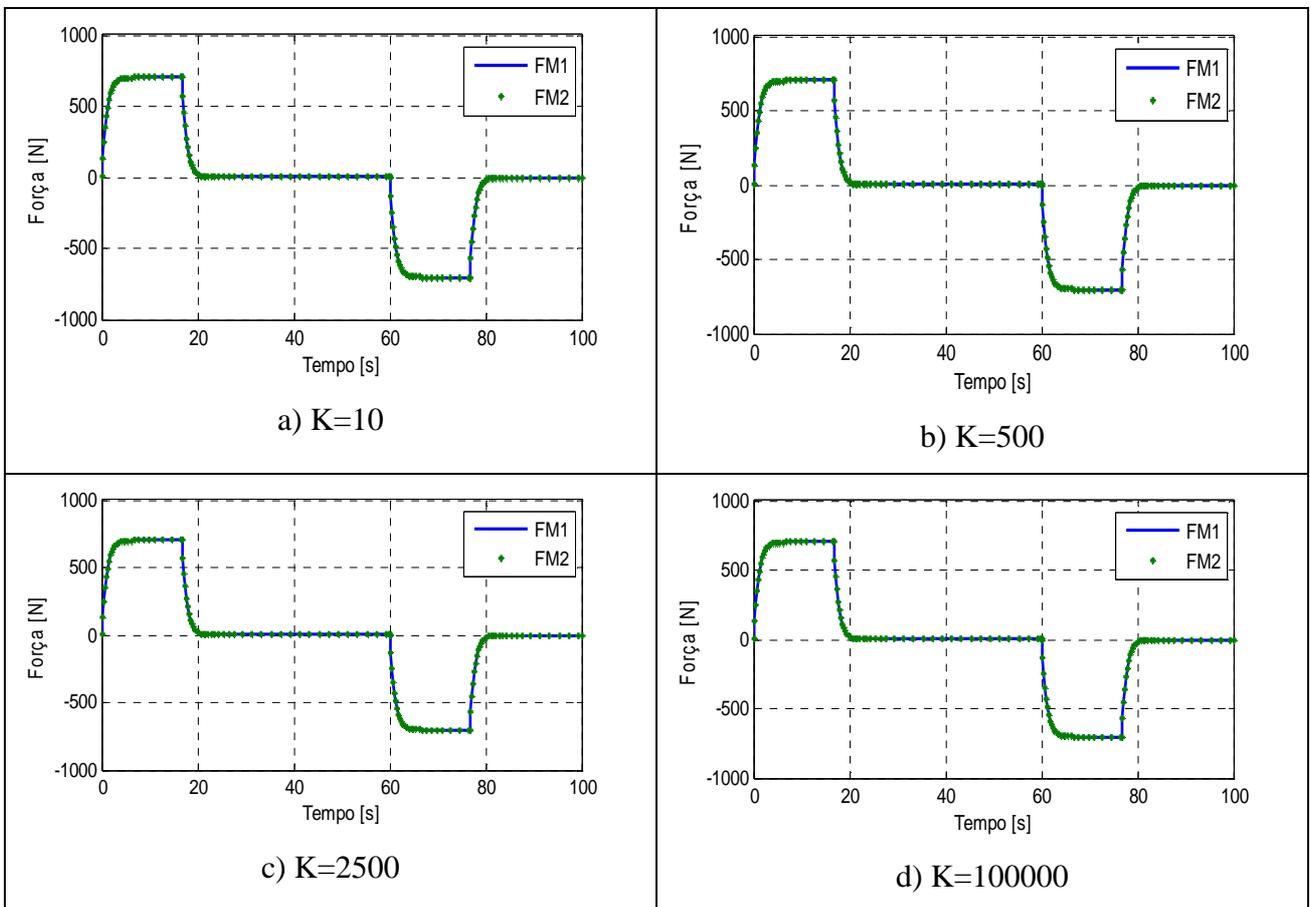


Figura. 4.7. Força 1 e Força 2, Caso 1 b, REG = 1.

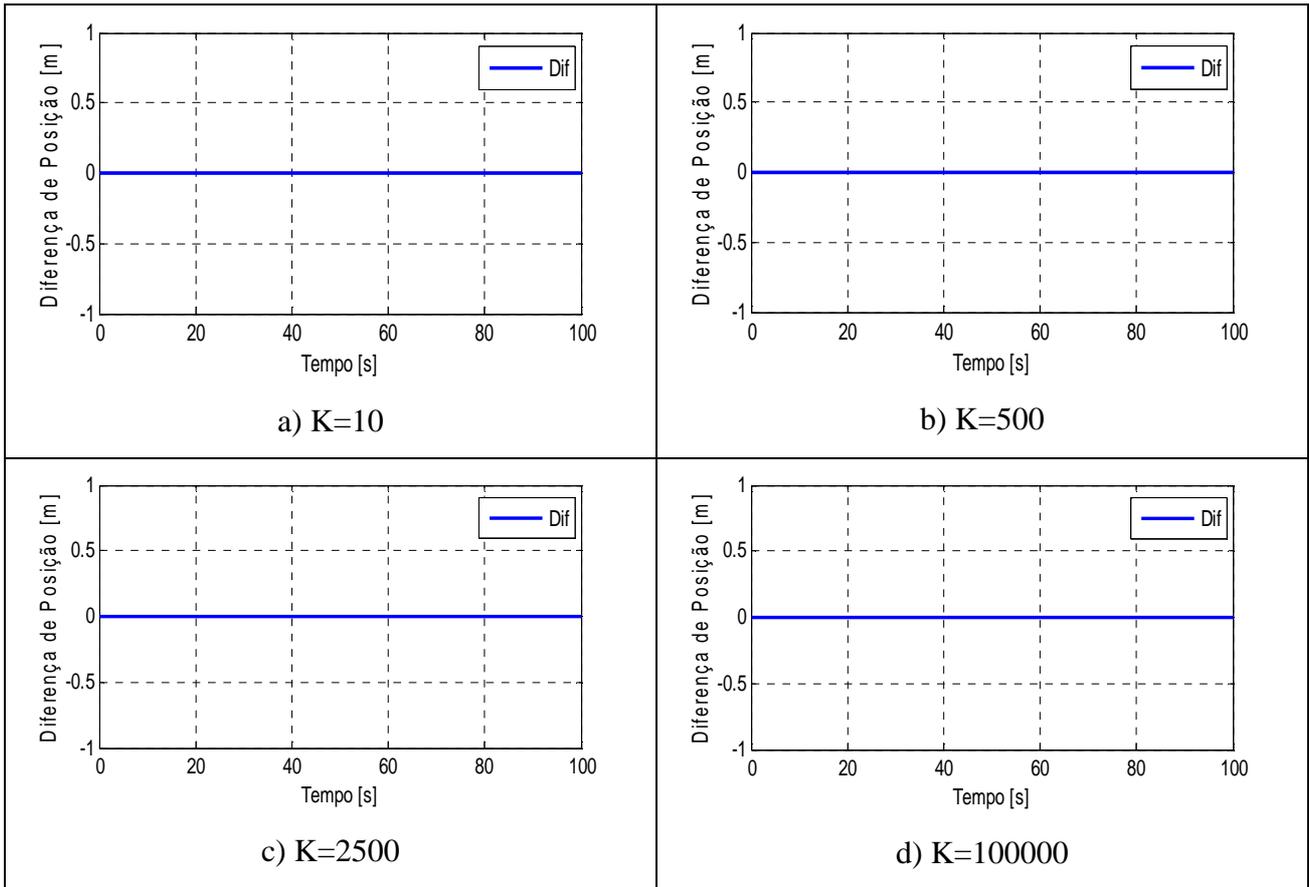


Figura. 4.8. Diferença de posição, Caso 1 b, REG = 1.

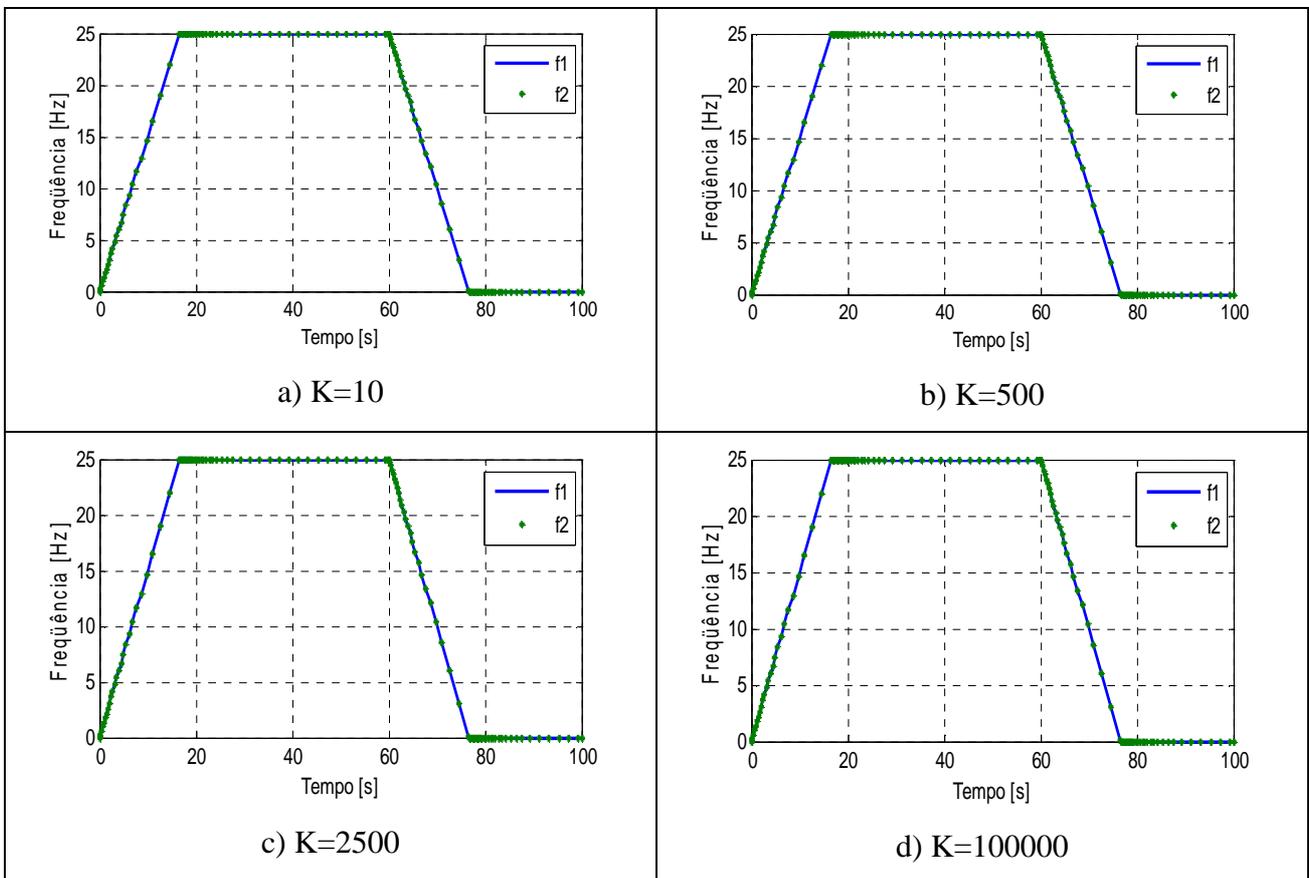


Figura. 4.9. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1 b, REG = 1.

Para os casos 1(a) e 1(b), conclui-se que quando as massas forem iguais não se tem uma diferença de posição entre os módulos, independentemente do valor da constante da mola  $K$ .

Durante a aceleração e frenagem, a força para 1500 kg é maior do que para 500 kg

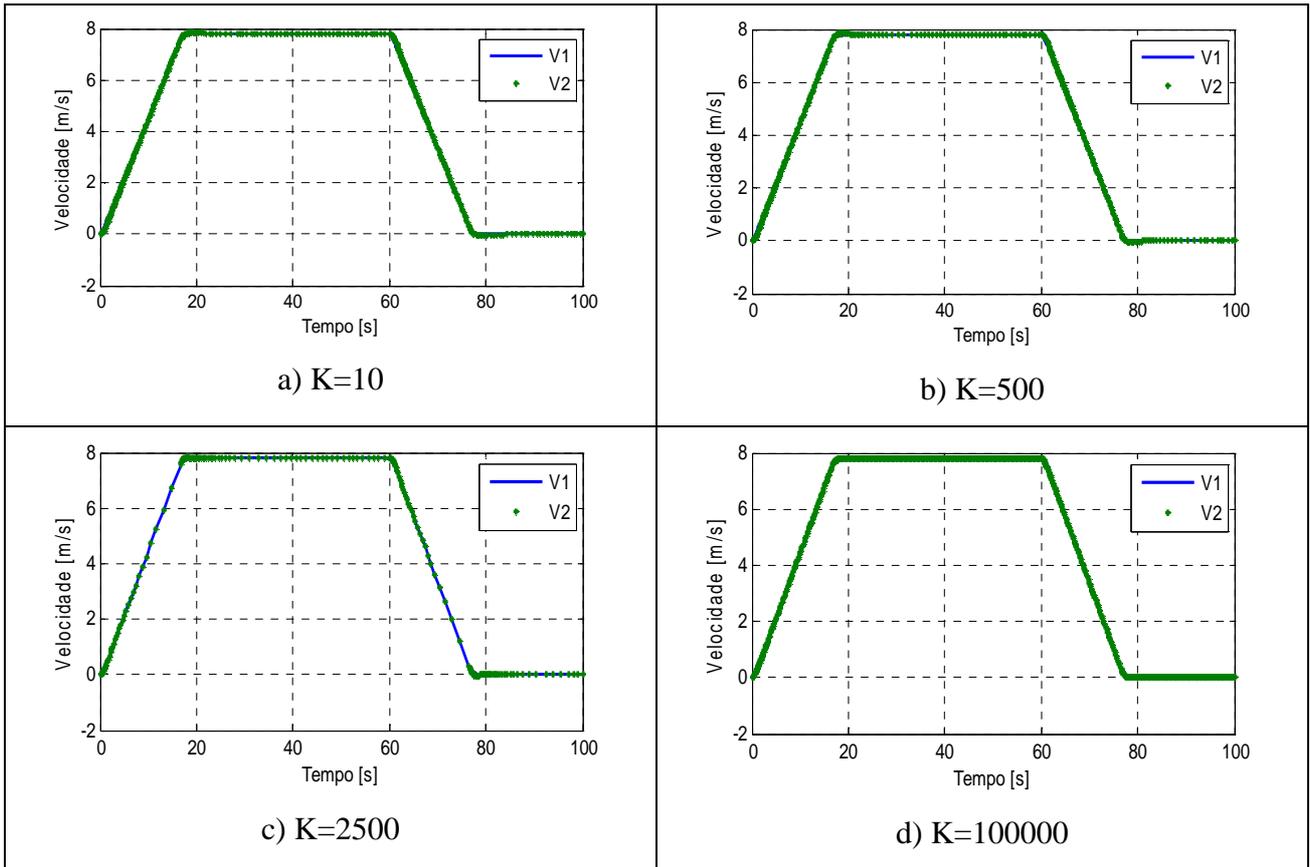


Figura. 4.10. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 c, REG = 1.

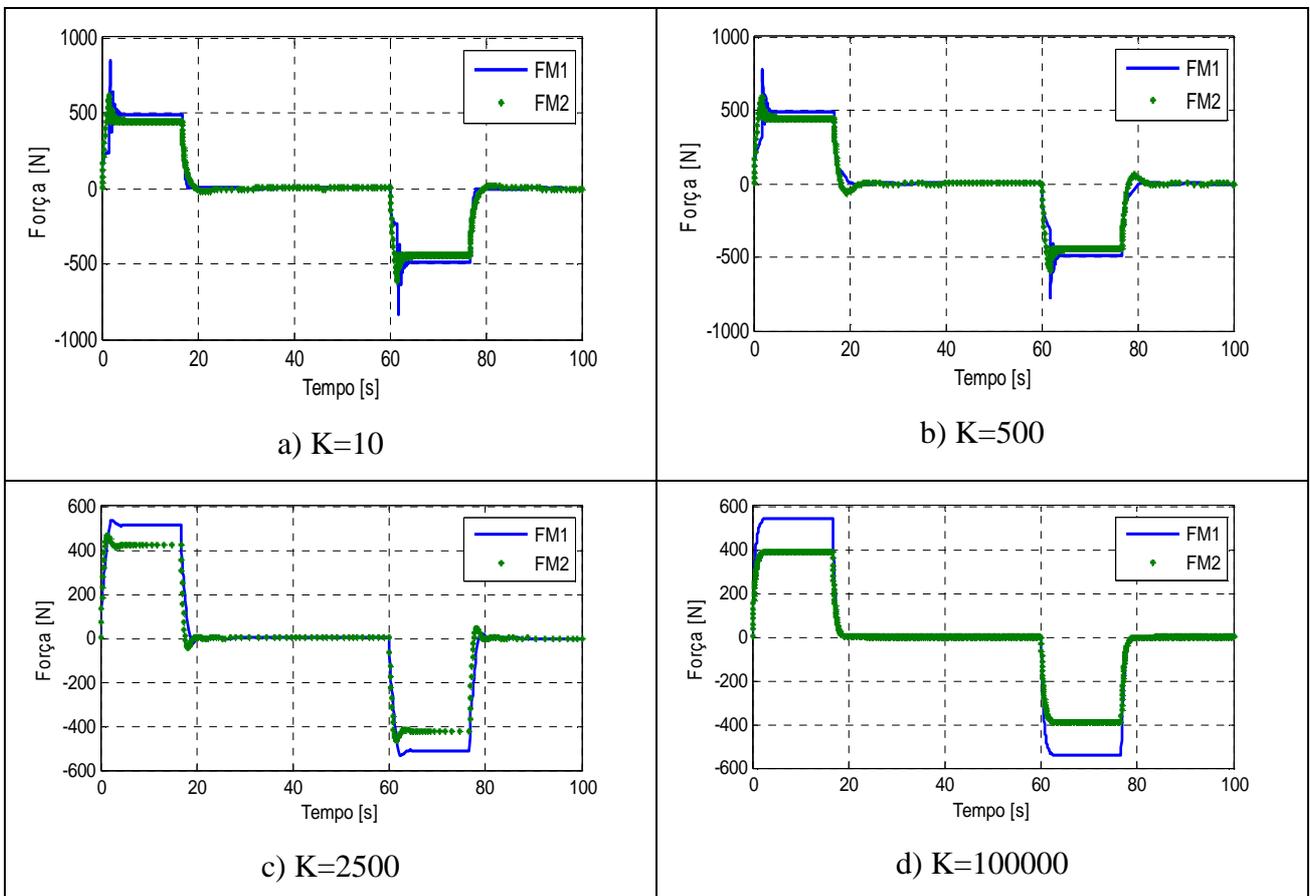


Figura. 4.11. Força 1 e Força 2, Caso 1 c, REG = 1.

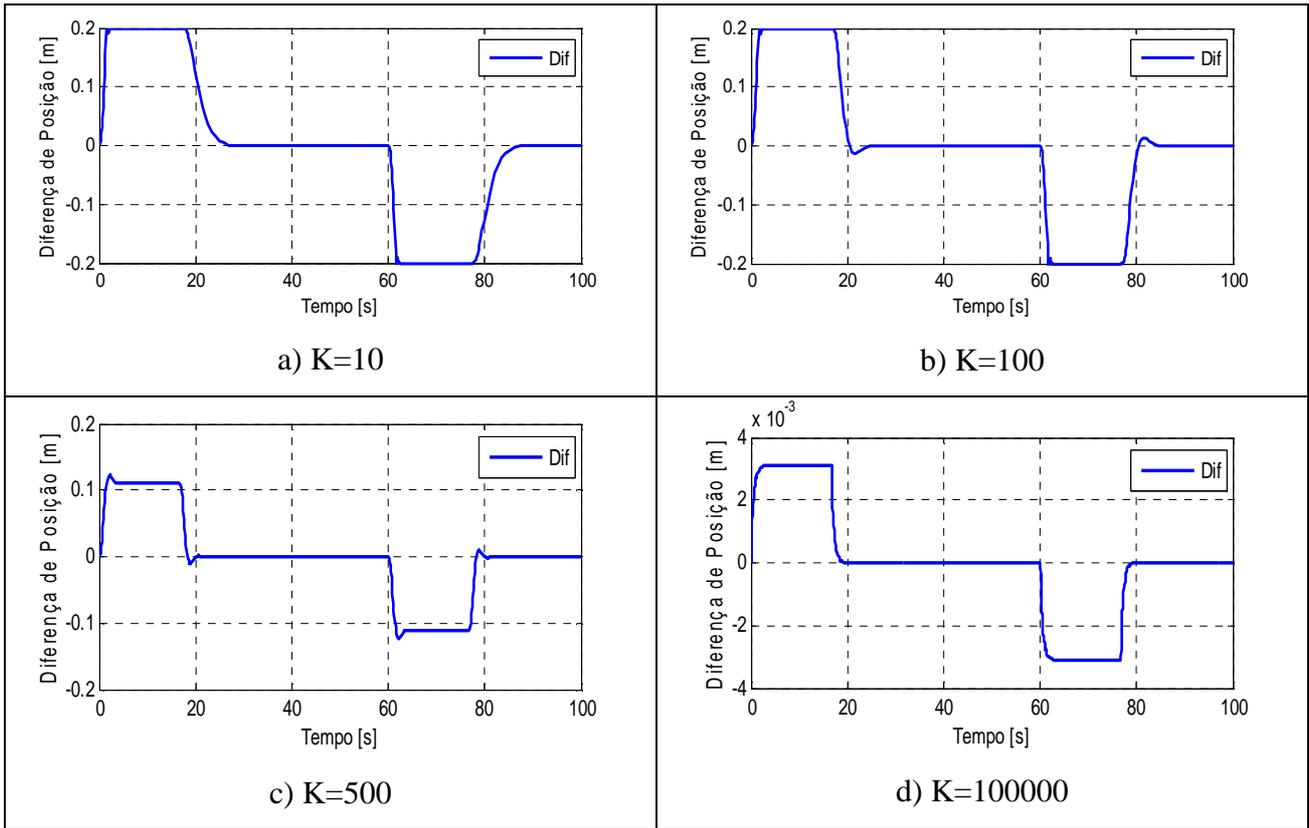


Figura. 4.12. Diferença de posição, Caso 1 c, REG = 1.

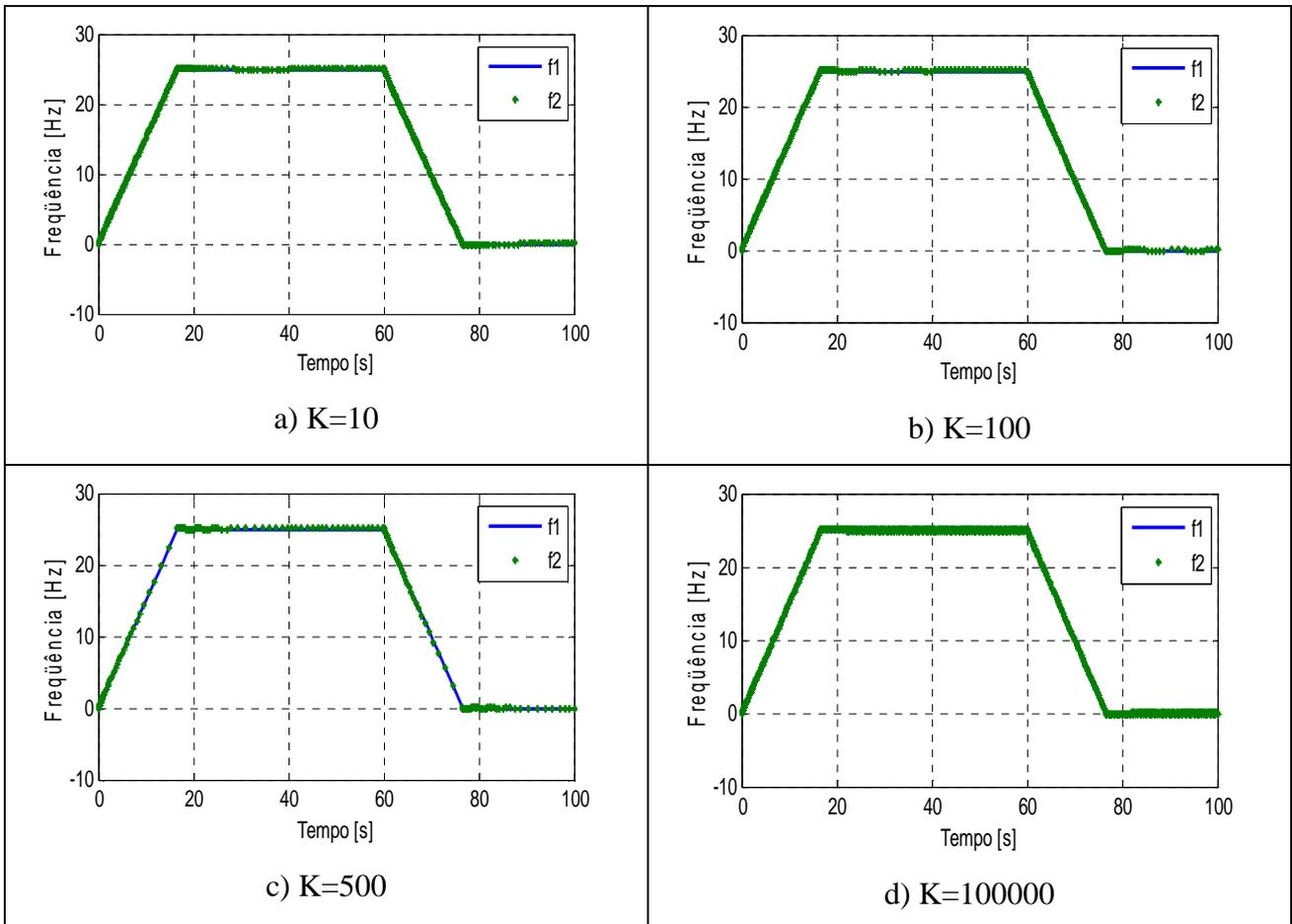


Figura. 4.13. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1 c, REG = 1.

Para a condição 1 (c), conclui-se que a mola atinge seus valores máximos e mínimos para os casos em que  $K= 10$  e  $500$  N/m. Para compensar isto, se sugere colocar um regulador proporcional com  $REG = 10$ . Os resultados a seguir mostram que a diferença de posição não atinge os valores extremos.

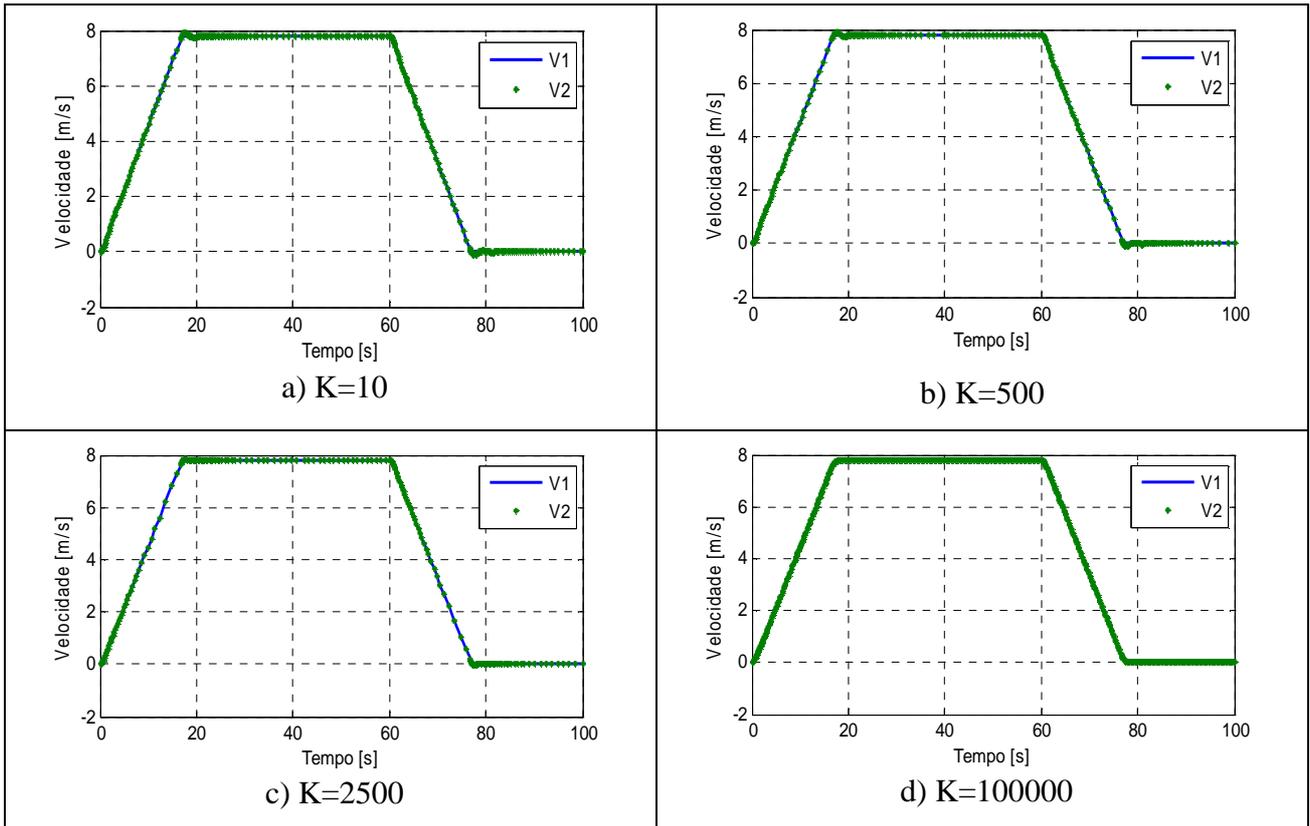


Figura. 4.14. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 d, REG = 10.

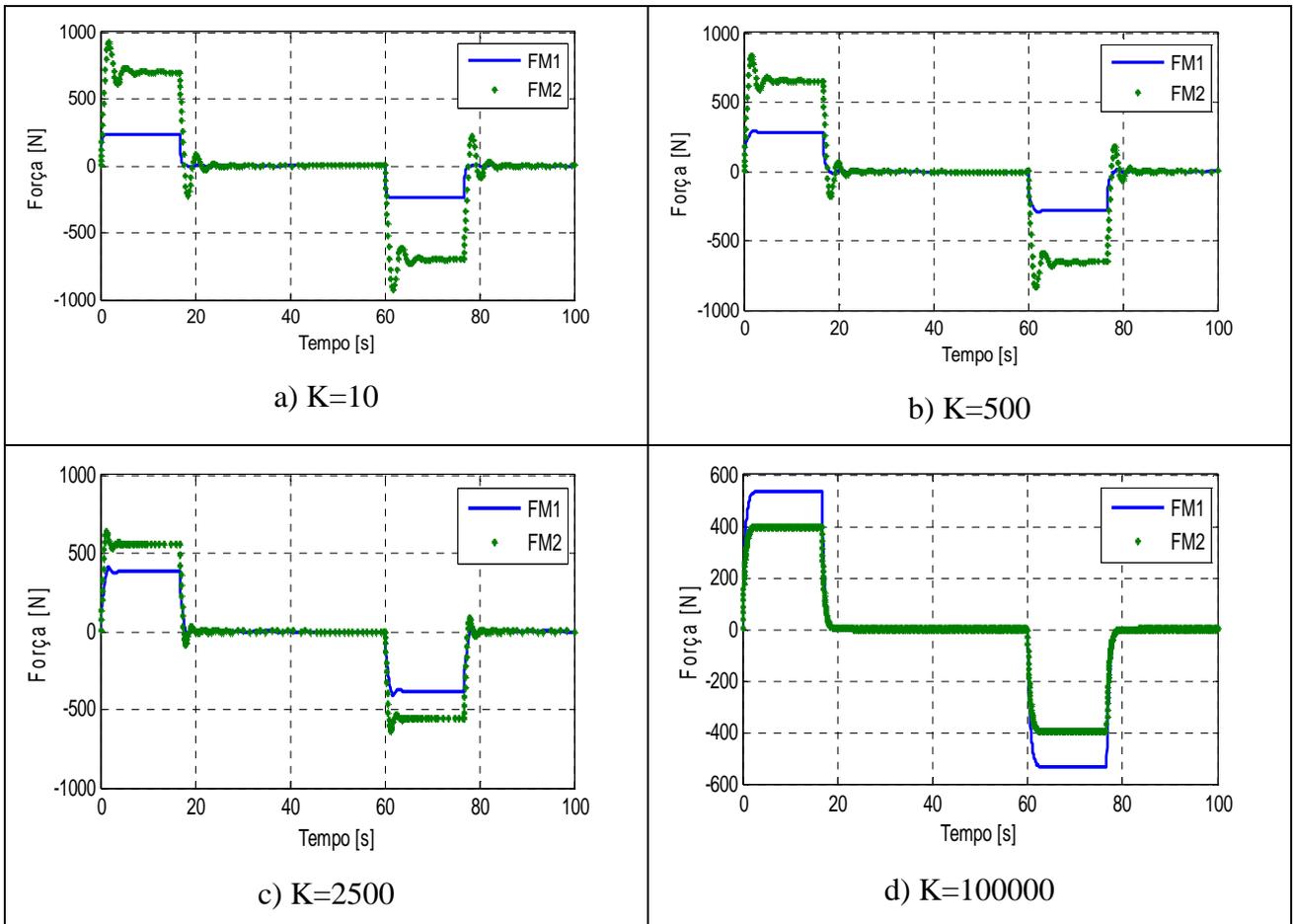


Figura. 4.15. Força 1 e Força 2, Caso 1 c, REG = 10.

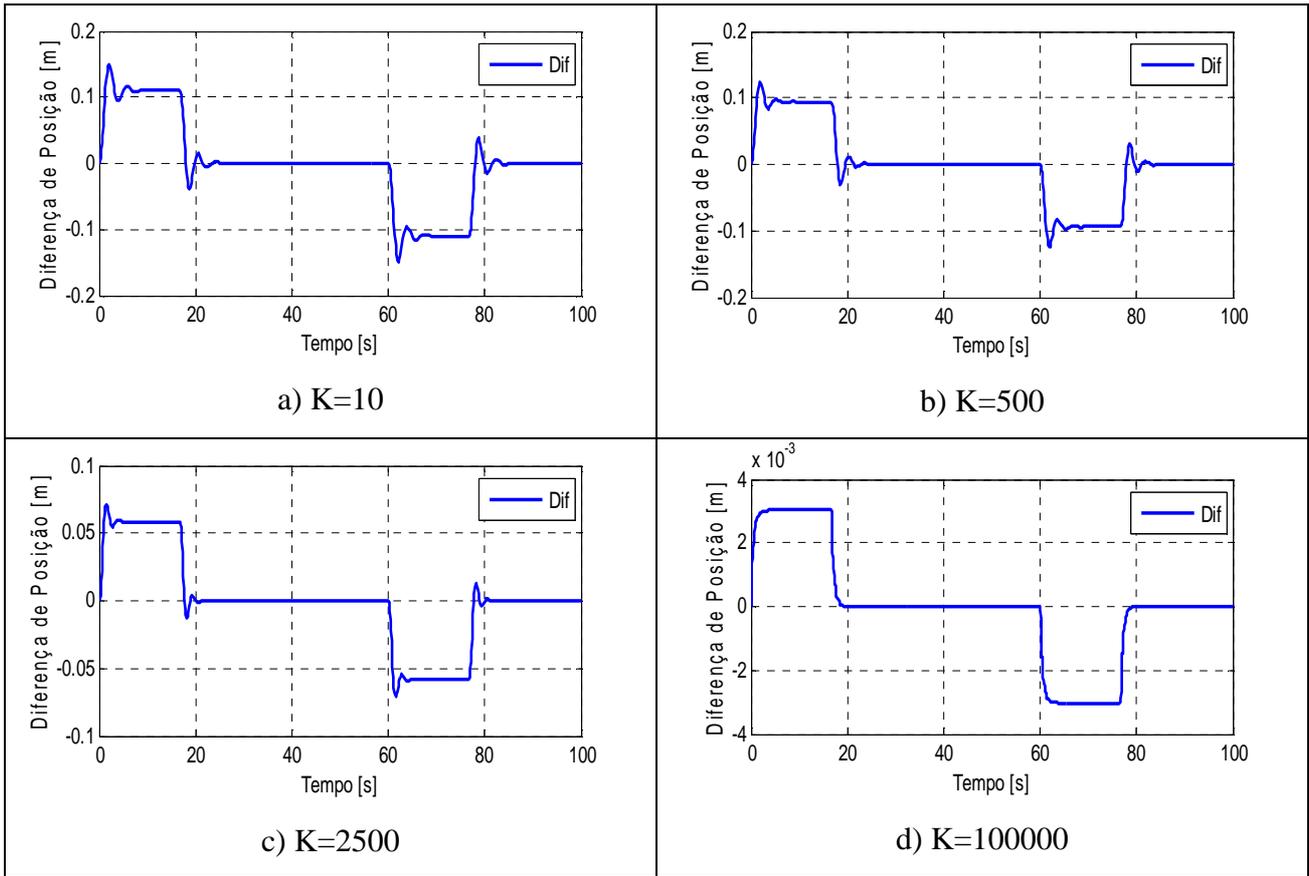


Figura. 4.16. Diferença de posição, Caso 1 d, REG = 10.

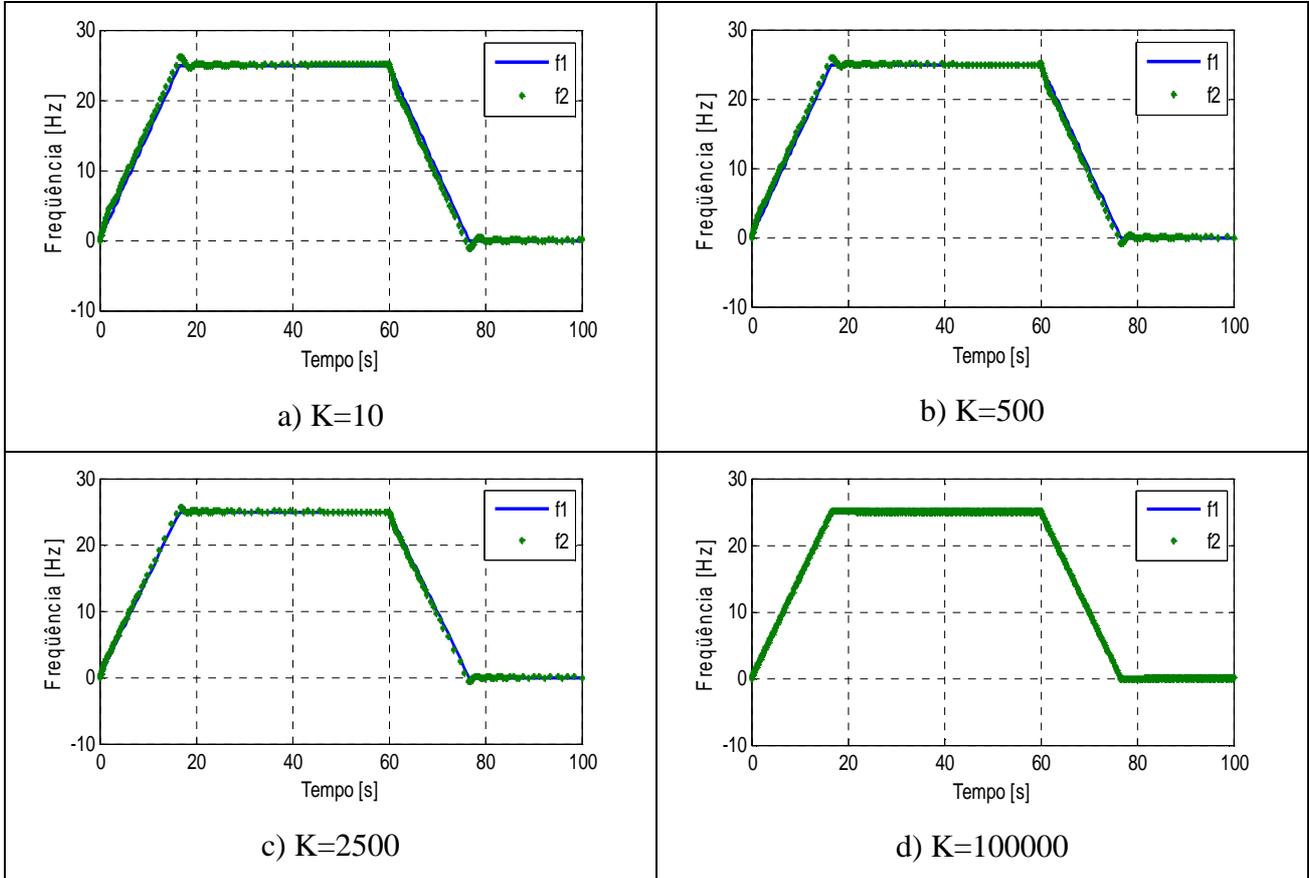


Figura. 4.17. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1 d, REG = 10.

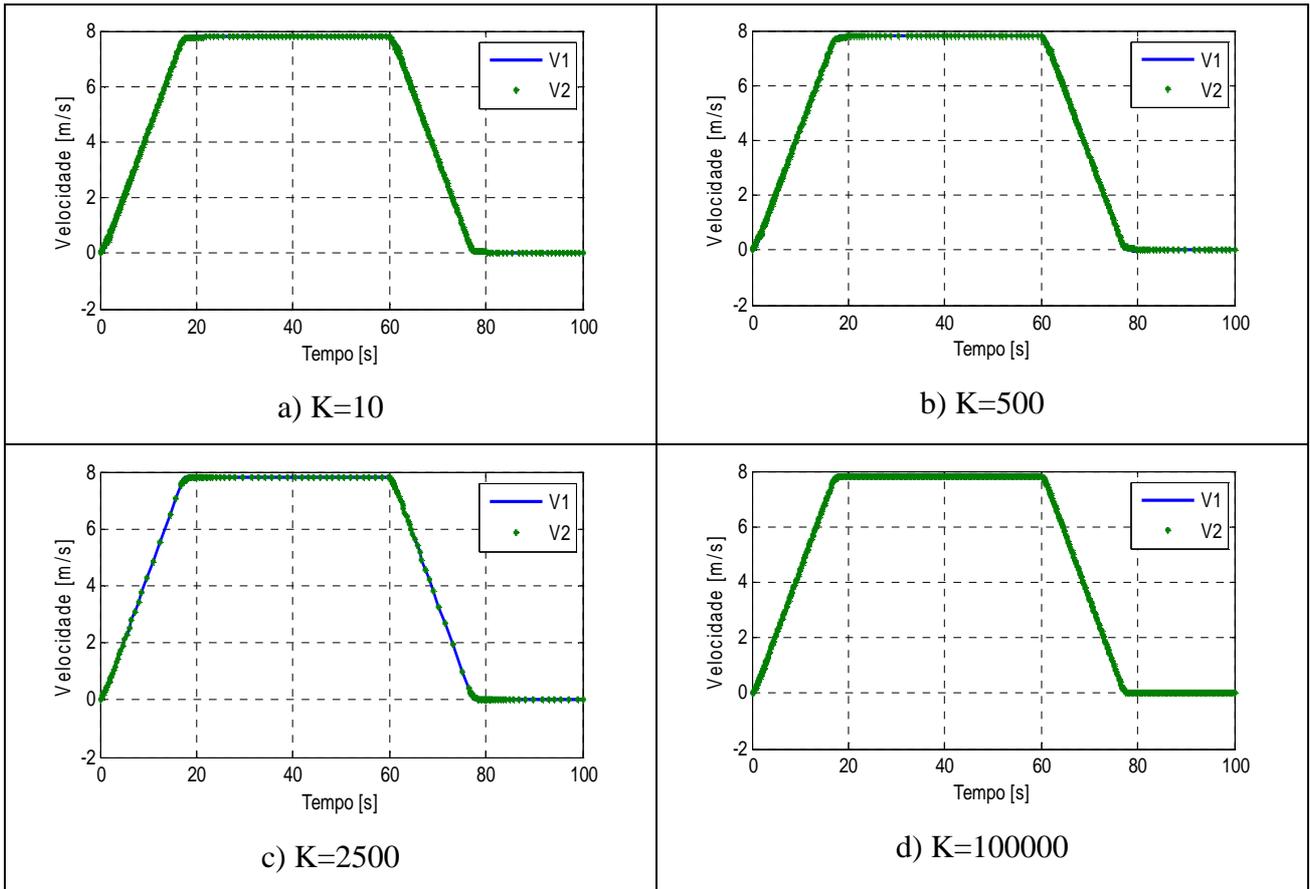


Figura. 4.18. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 d, REG = 1.

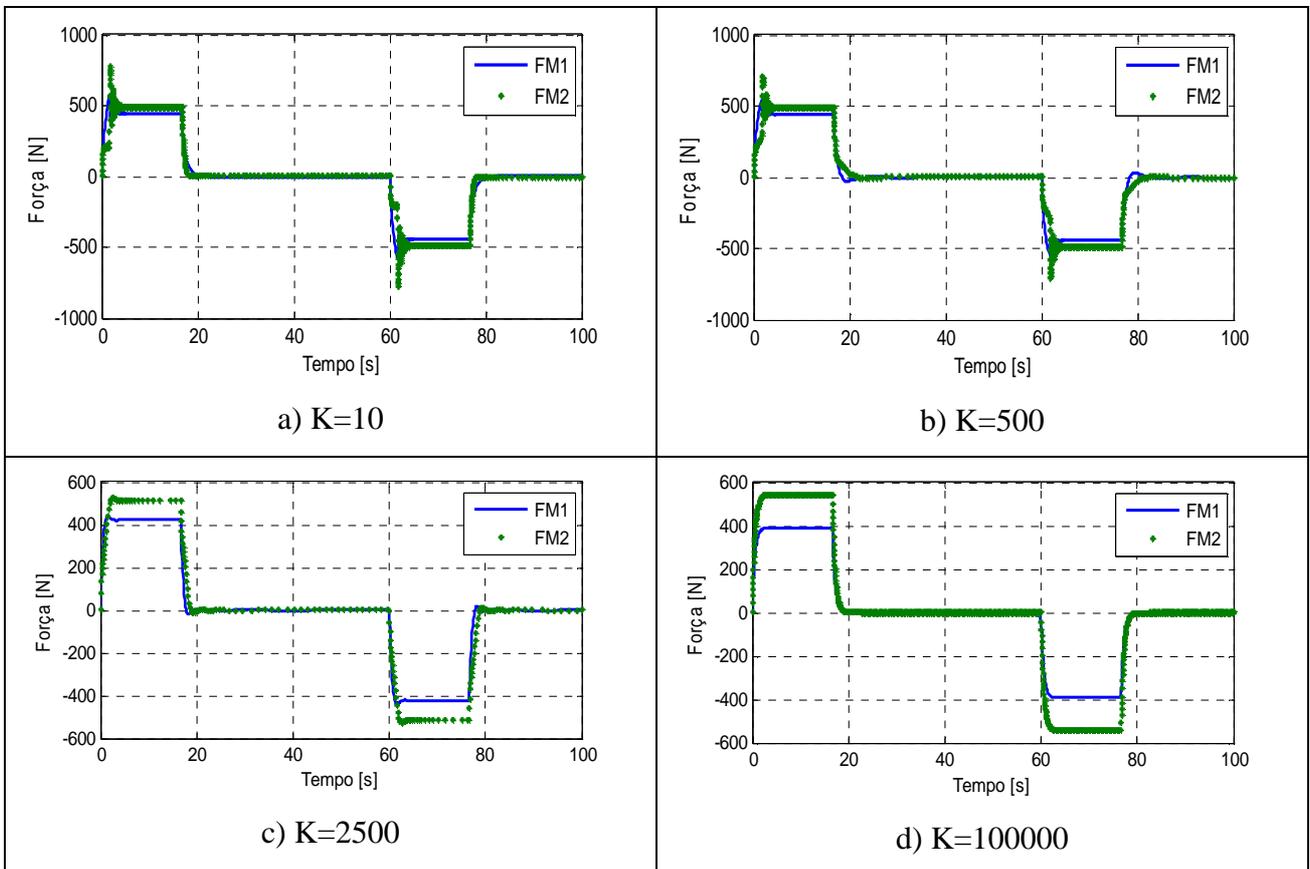


Figura. 4.19. Força 1 e Força 2, Caso 1 d, REG = 1.

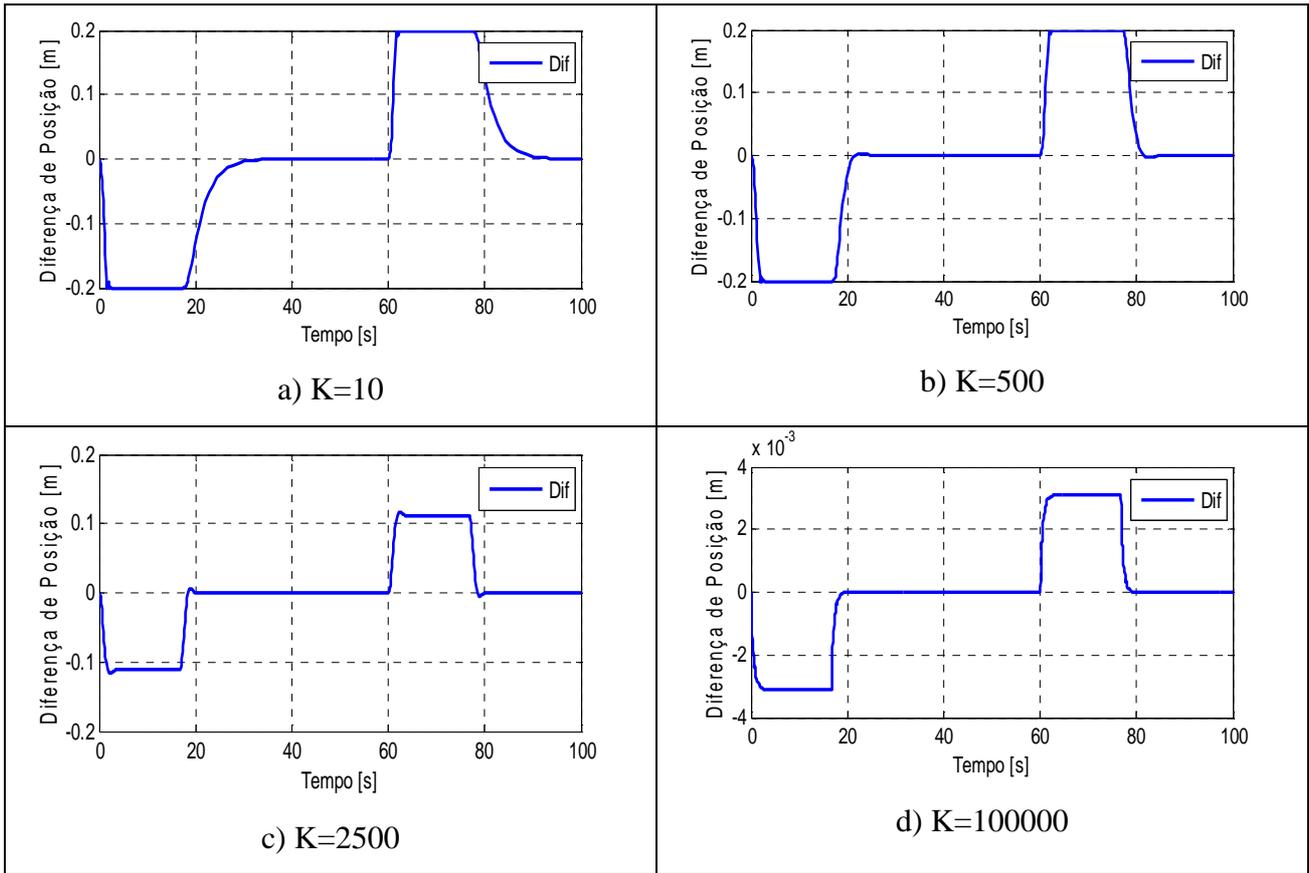


Figura. 4.20. Diferença de posição, Caso 1 d, REG = 1.

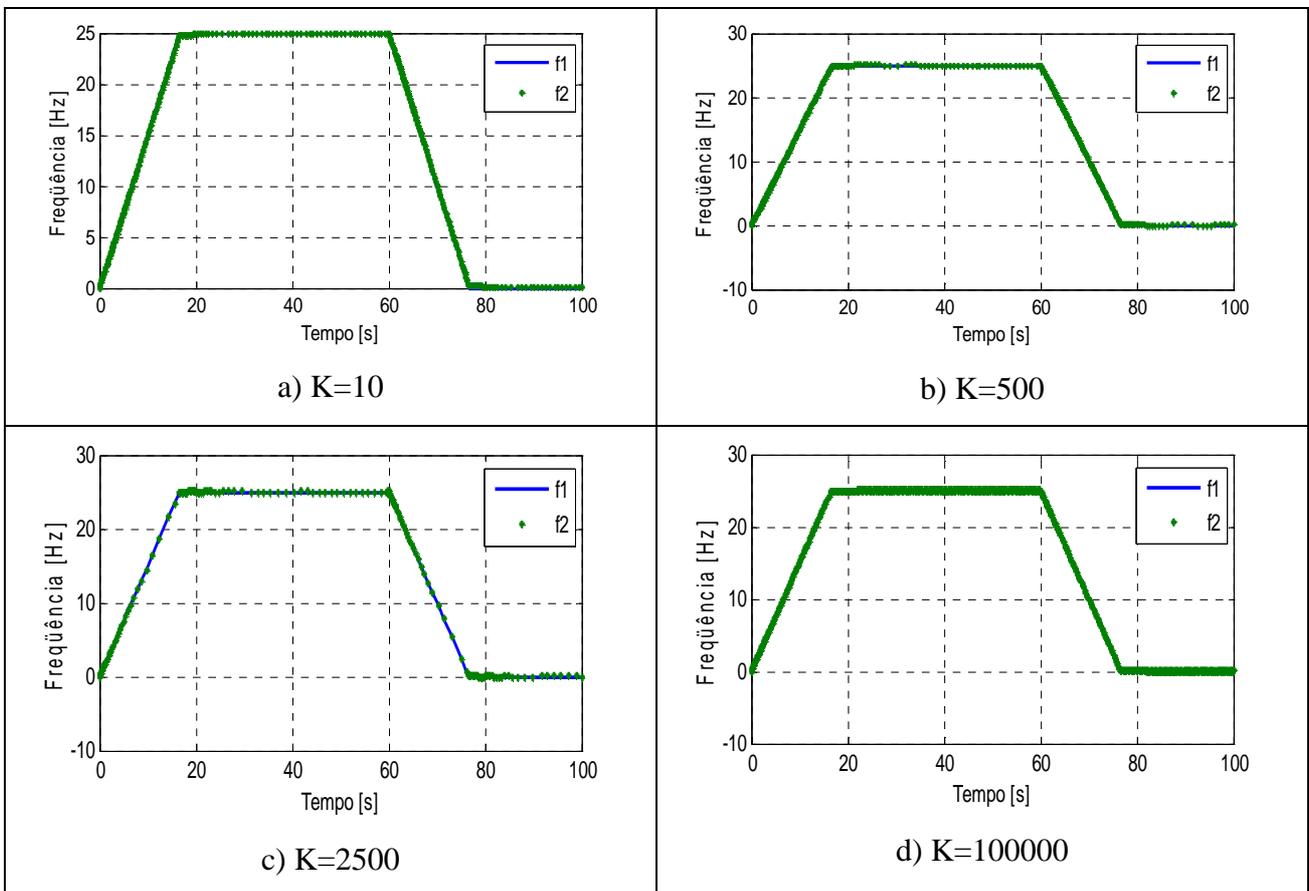


Figura. 4.21. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1 d, REG = 1.

Comparando-se os resultados das condições 1(c) e 1(d), verifica-se que existe uma simetria no comportamento, como era de se esperar.

Para a condição 1(d), conclui-se que a mola atinge seus valores máximos e mínimos para os casos em que  $K = 10$  e  $500 \text{ N/m}$ . Para compensar isto, se sugere novamente colocar um regulador proporcional com  $\text{REG} = 10$ . Os resultados a seguir mostram que a diferença de posição não atinge os valores extremos.

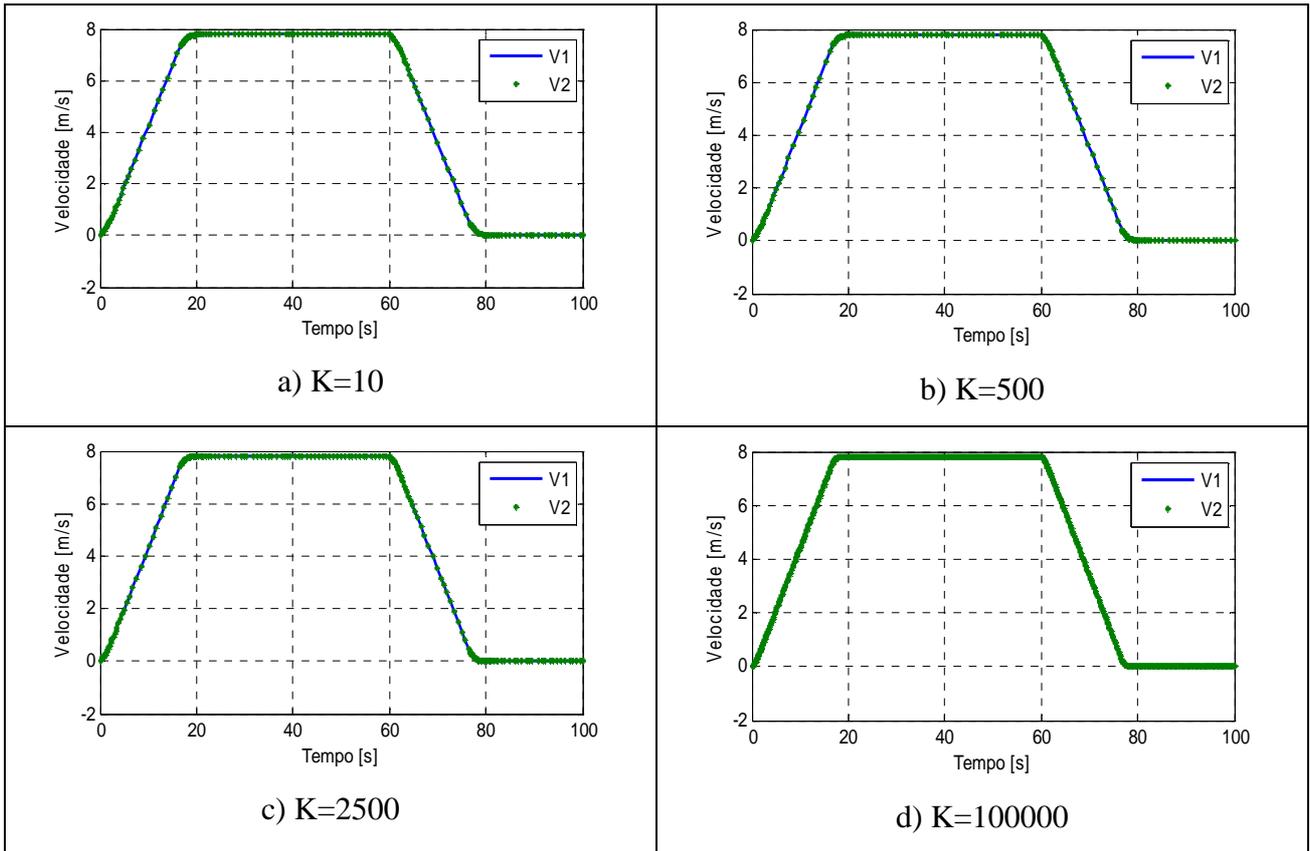


Figura. 4.22. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 1 d, REG = 10.

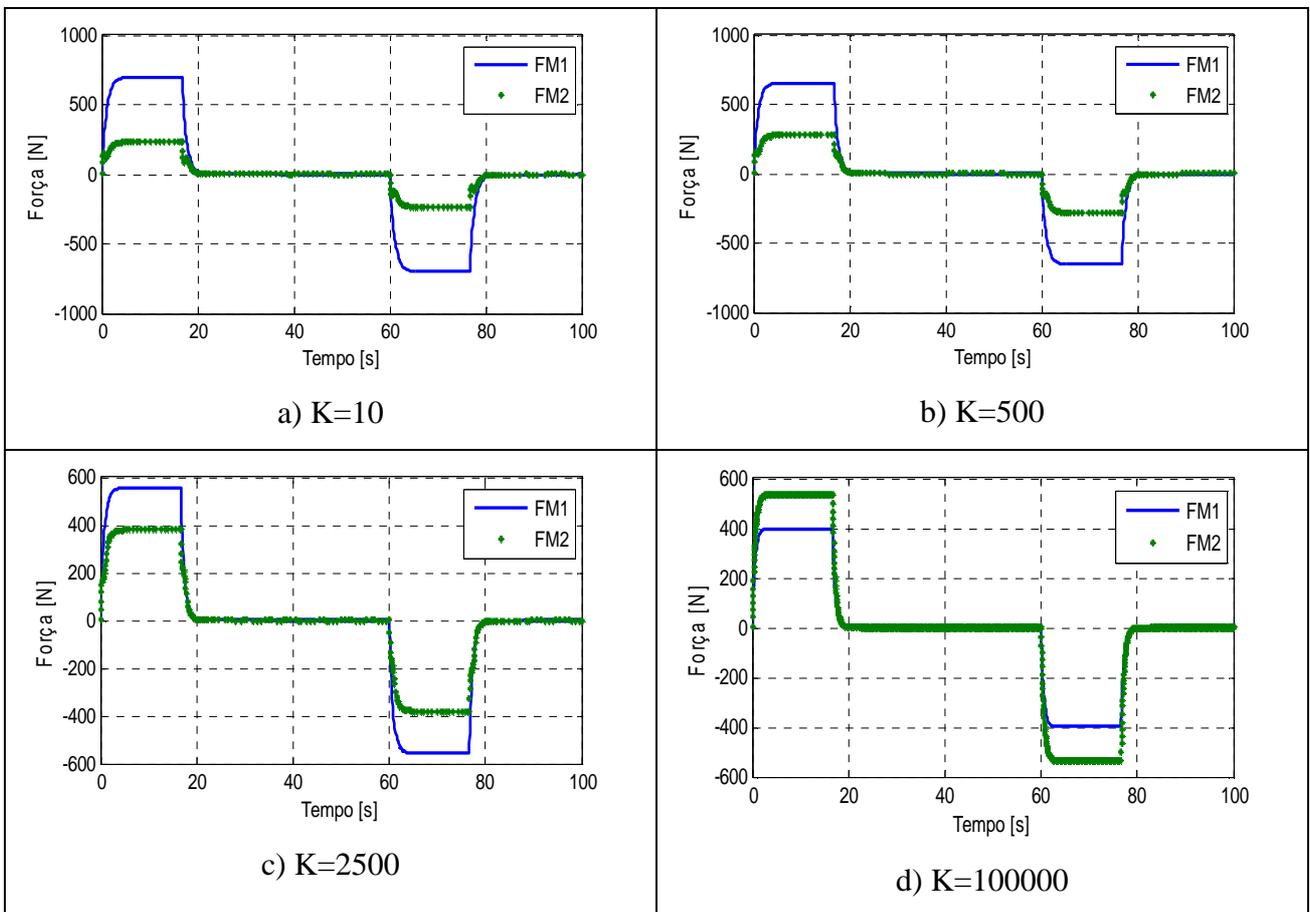


Figura. 4.23. Força 1 e Força 2, Caso 1 d, REG = 10.

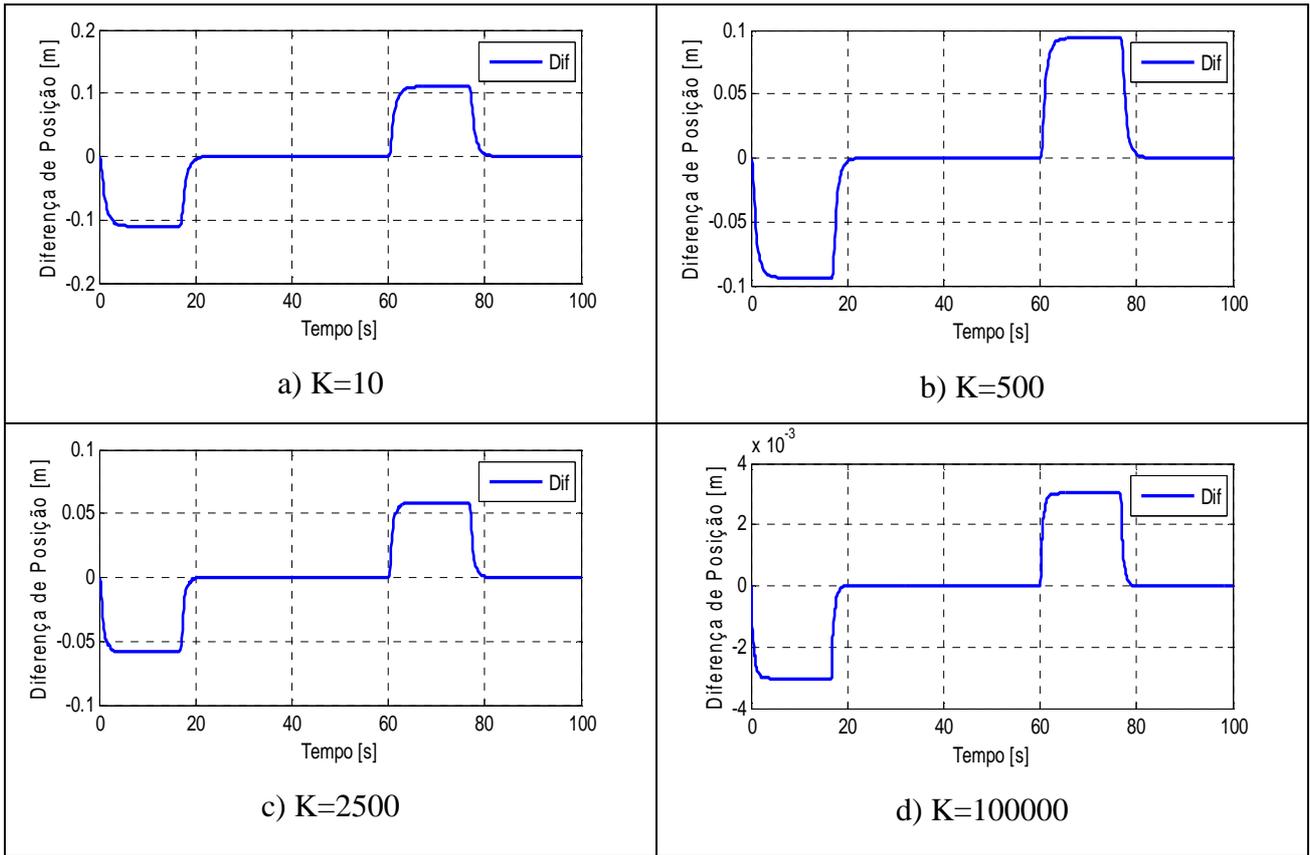


Figura. 4.24. Diferença de posição, Caso 1 d, REG = 10.

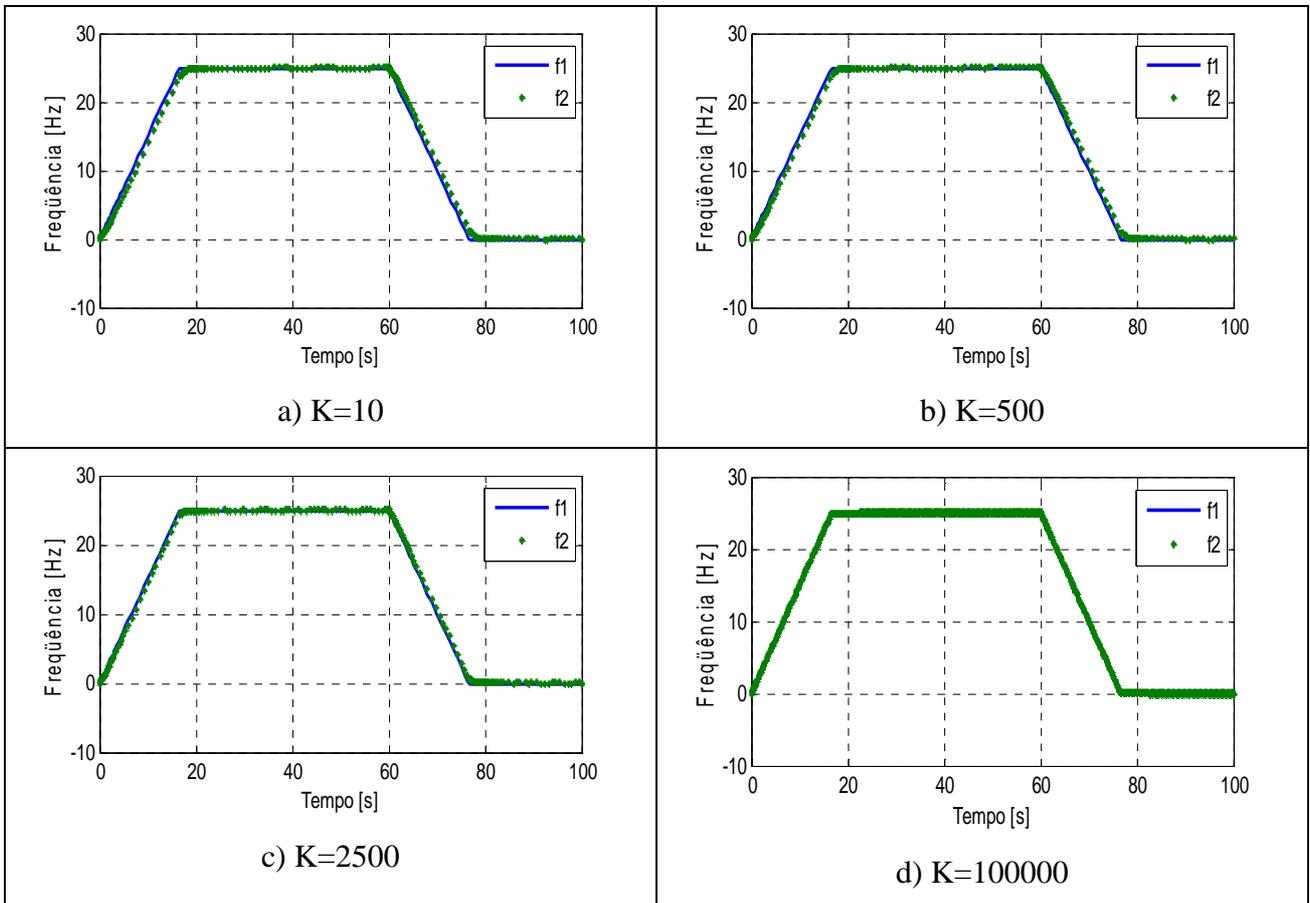


Figura. 4.25. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 1d, REG = 10.

#### 4.3.2. CASO 2 TRAJETÓRIA PLANA E VARIAÇÃO DE MASSA.

Para este caso, tomaram-se em conta os valores apresentados na tabela 4.2. A variação de massa influencia diretamente o comportamento do motor linear. Esta variação ocorre no segundo 30.

Tabela 4.2. Parâmetros para a simulação com trajetória plana e variação de massa.

<b>Caso</b>	<b>M1 [kg]</b>	<b>M2 [kg]</b>	<b>K [N/m]</b>	<b>Ganho1 [Ns/m]</b>	<b>Ganho2 [Ns/m]</b>	<b>Observações</b>
<b>2a</b>	500 até 1500	1500 até 500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	variável	variável	Passageiros movem-se do módulo 2 para o módulo 1 em t=30s.
<b>2b</b>	1500 até 500	500 até 1500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	variável	variável	Passageiros movem-se do módulo 1 para o módulo 2 em t=30s.

Apresentam-se as simulações feitas para um regulador proporcional onde REG = 1 nas seguintes figuras:

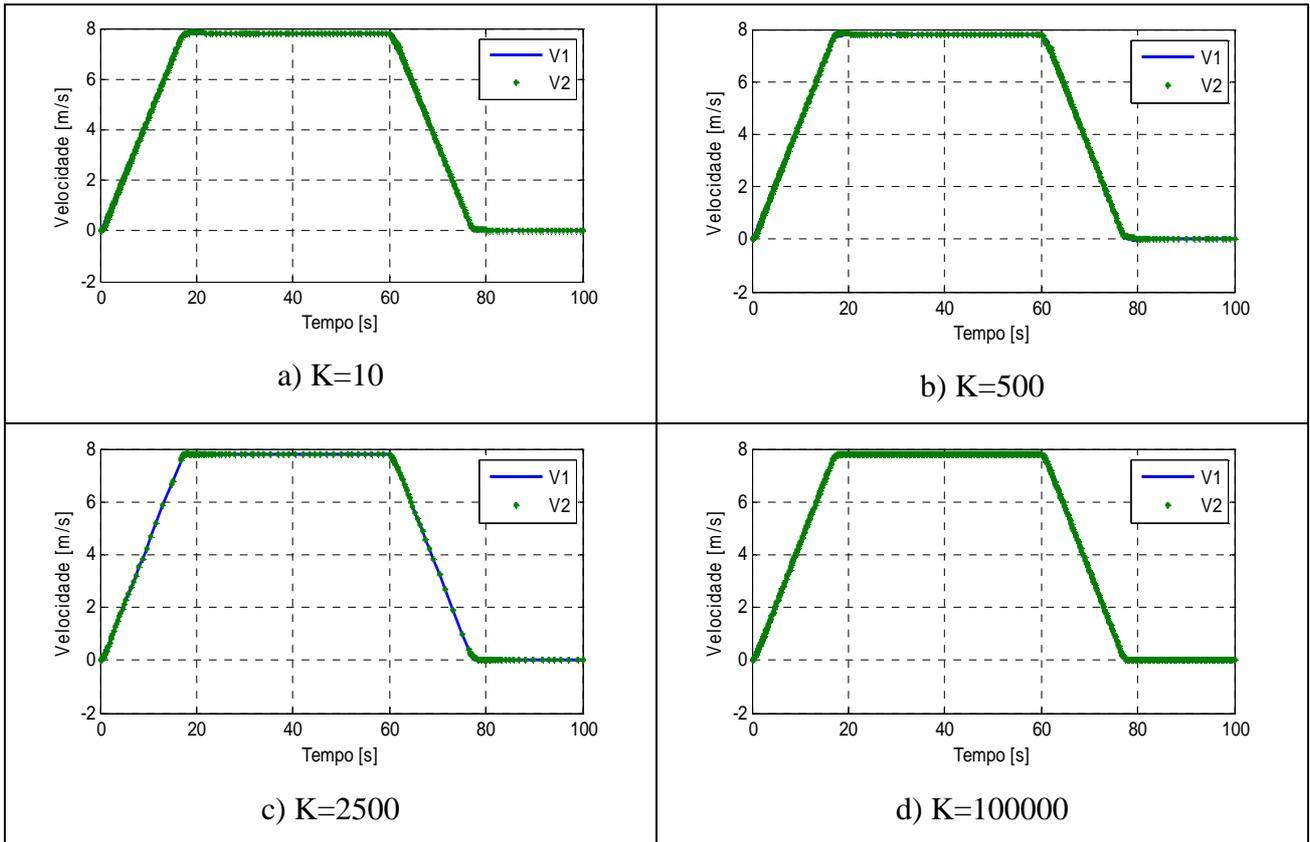


Figura. 4.26. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 2 a, REG = 1.

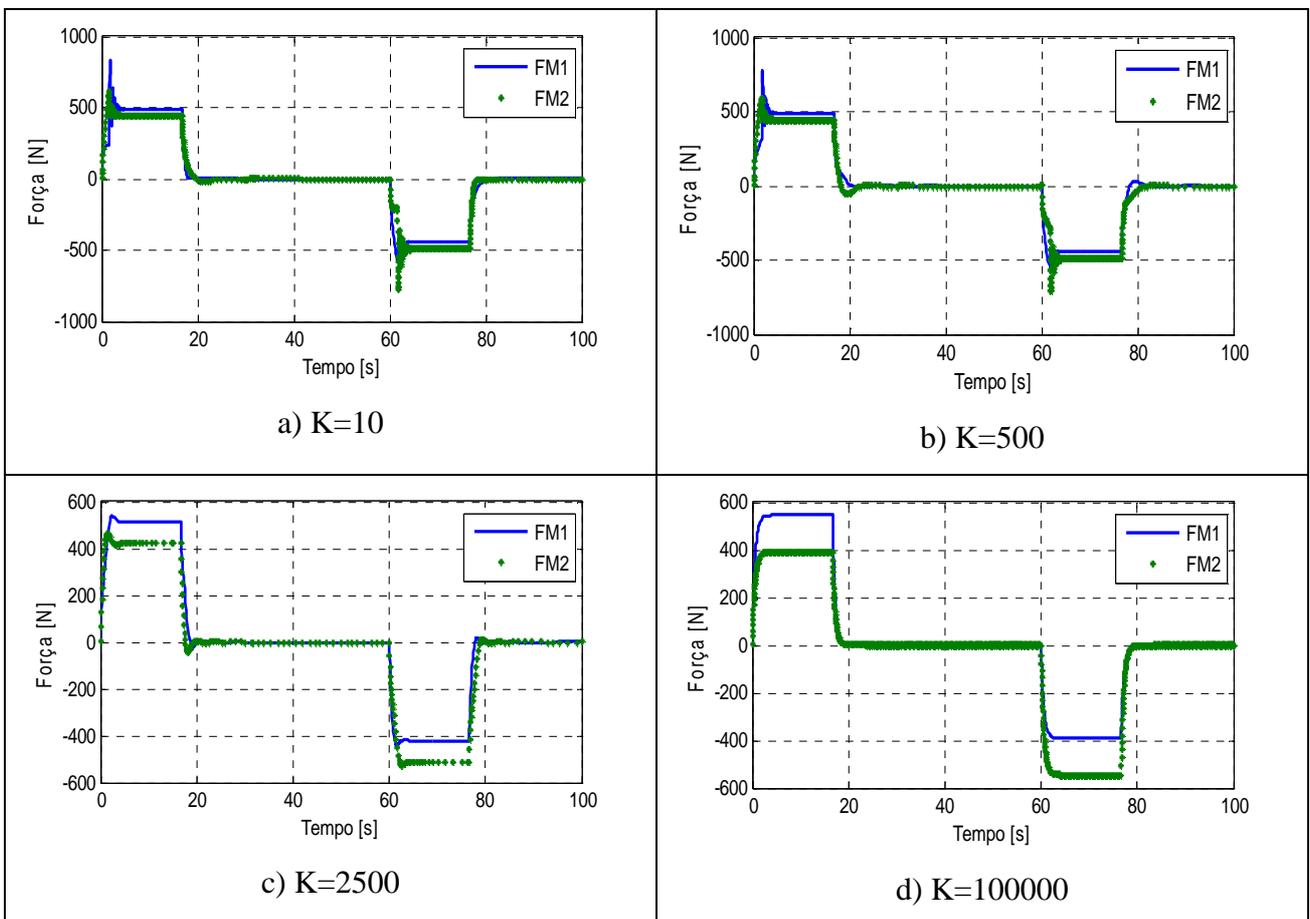


Figura. 4.27. Força 1 e Força 2, Caso 2 a, REG = 1.

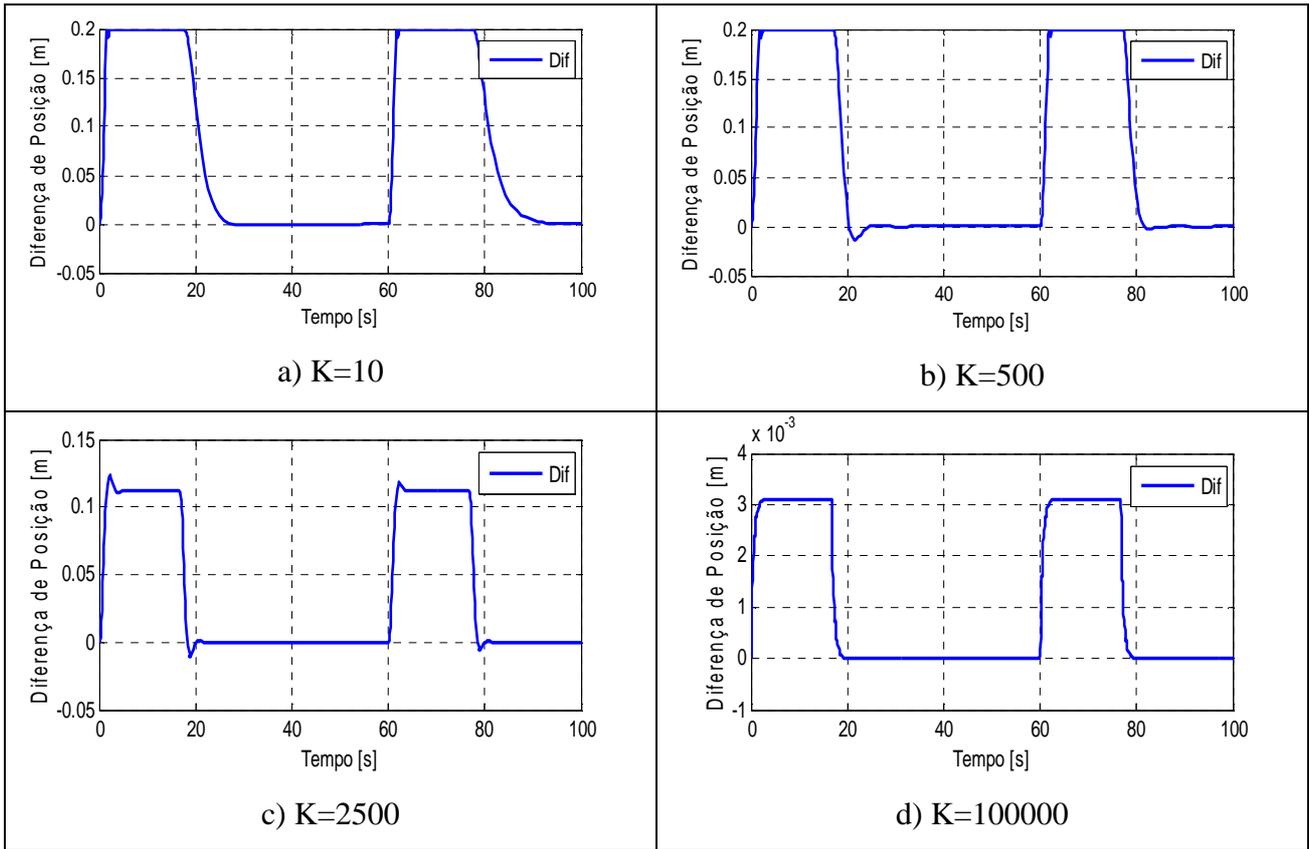


Figura. 4.28. Diferença de posição, Caso 2 a, REG = 1.

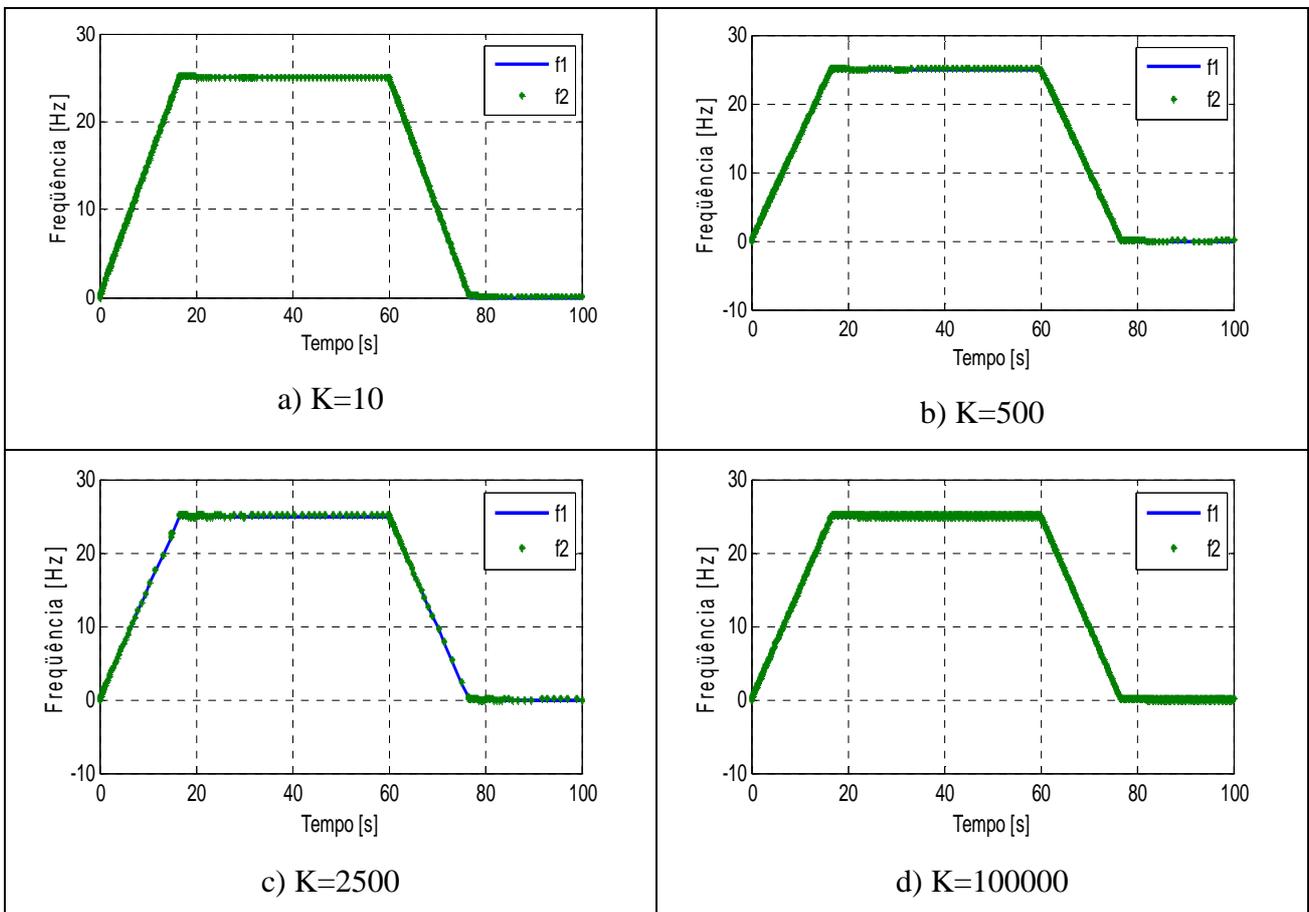


Figura. 4.29. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 2 a, REG = 1.

A variação de massa o ocorre no segundo 30, depois que o trem atingiu sua velocidade nominal. Uma vez que a velocidade era constante, esta mudança de massa não provocou alteração na força. Na verdade, este caso é uma combinação das condições apresentadas em 1(c). A diferença de posição atinge os seus valores máximos e mínimos para os casos em que  $K= 100$  e  $500$ . Para compensar isto se sugere colocar um regulador proporcional com  $REG = 10$ . Os resultados mostram que a diferença de posição não atinge agora os valores extremos.

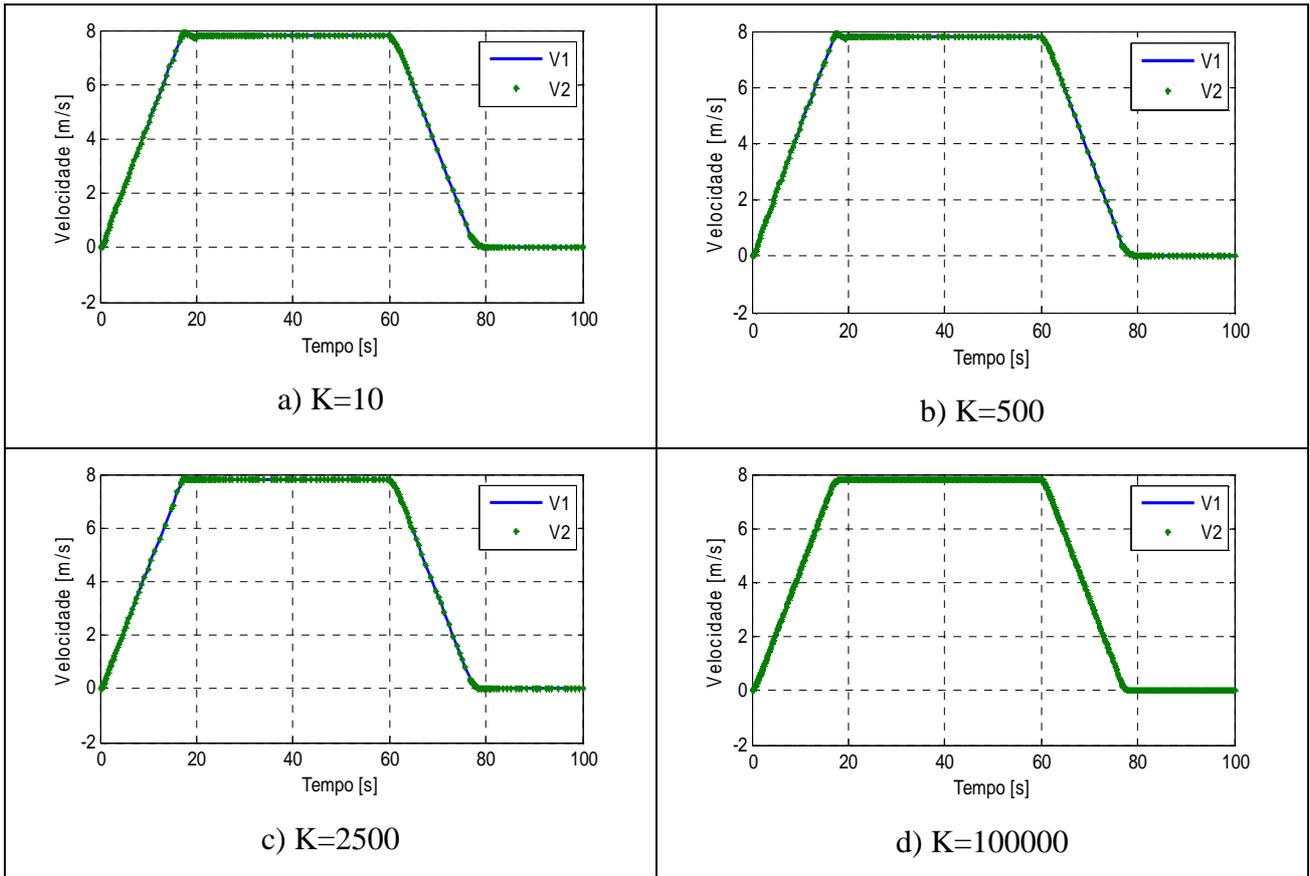


Figura. 4.30. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 2 a, REG = 10.

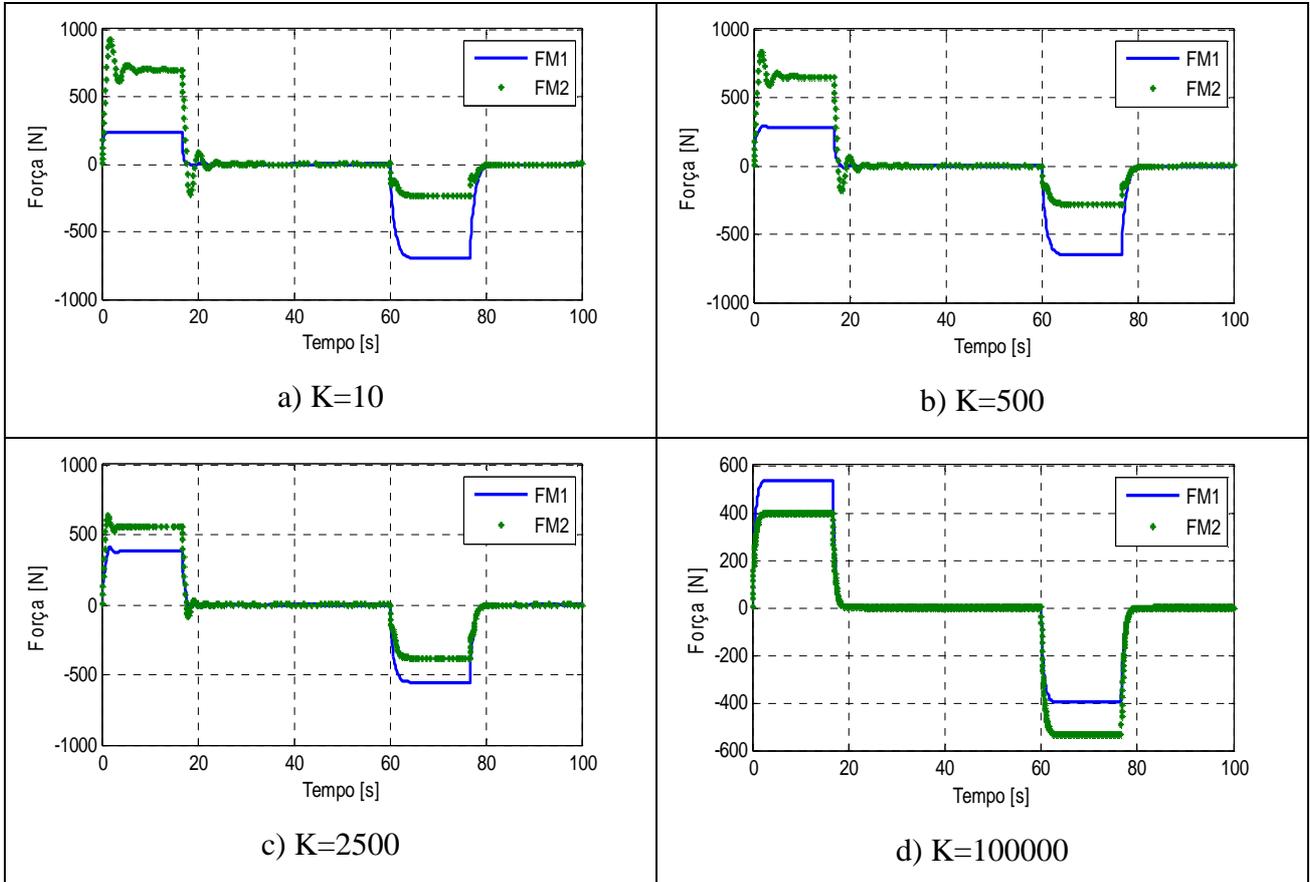


Figura. 4.31. Força 1 e Força 2, Caso 2 a, REG = 10.

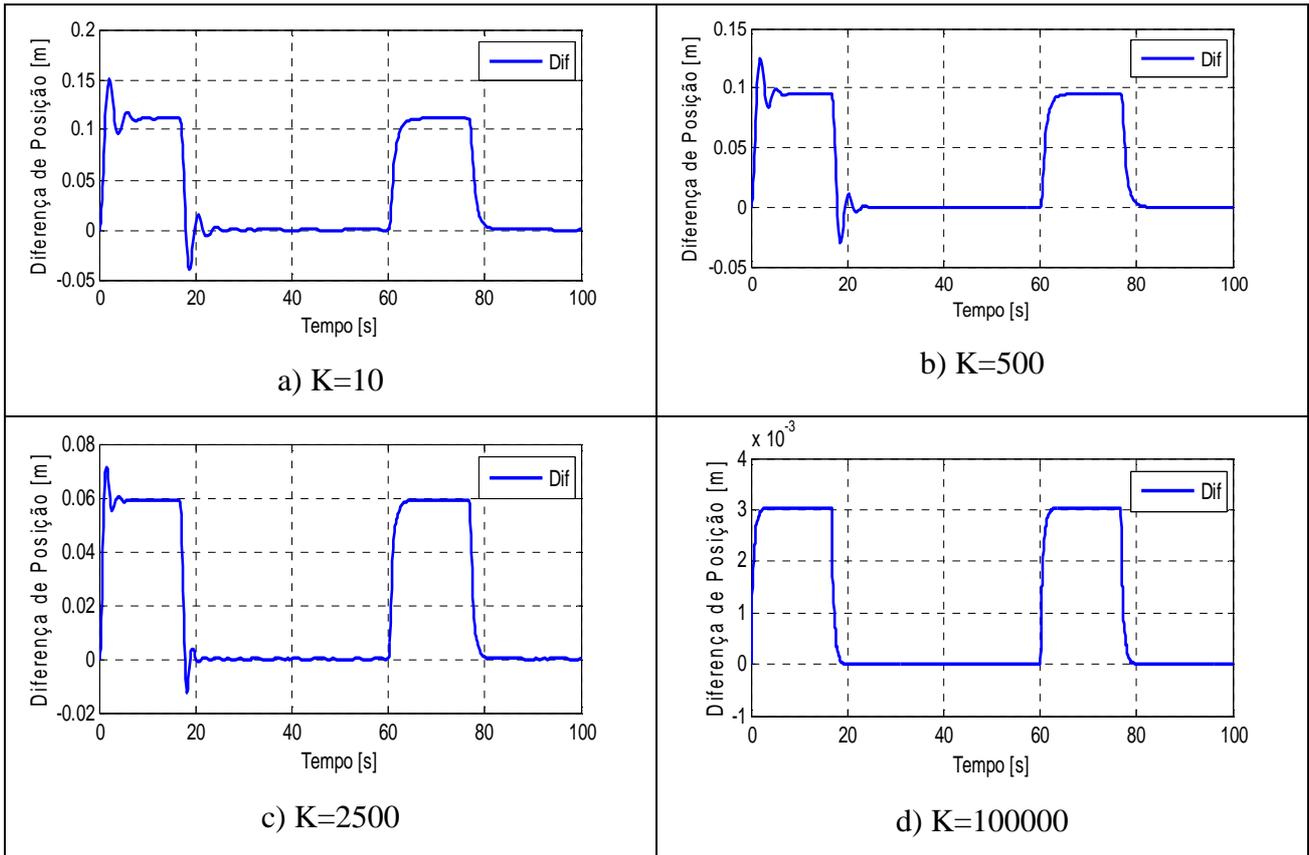


Figura. 4.32. Diferença de posição, Caso 2 a, REG = 10.

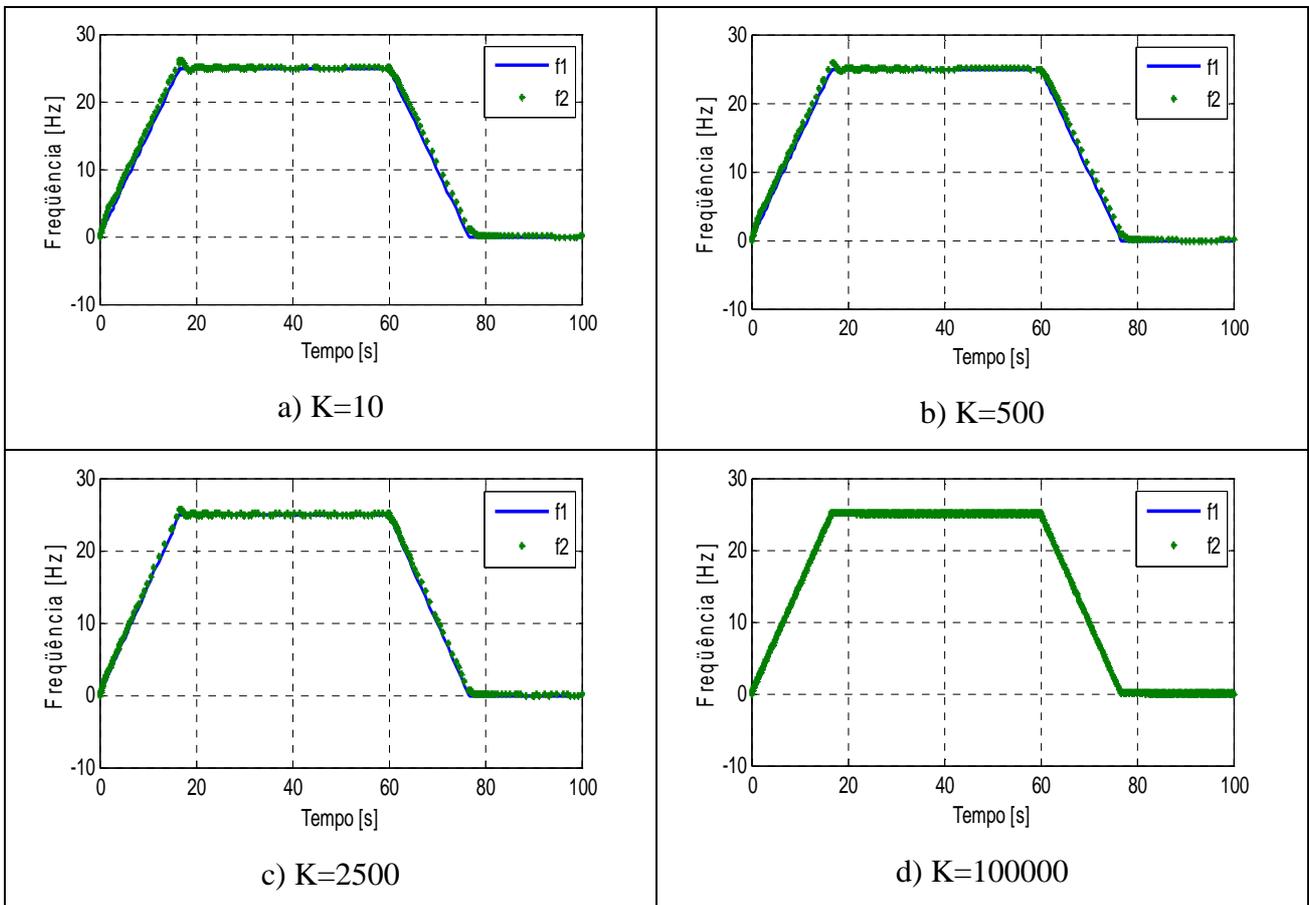


Figura. 4.33. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 2 a, REG = 10.

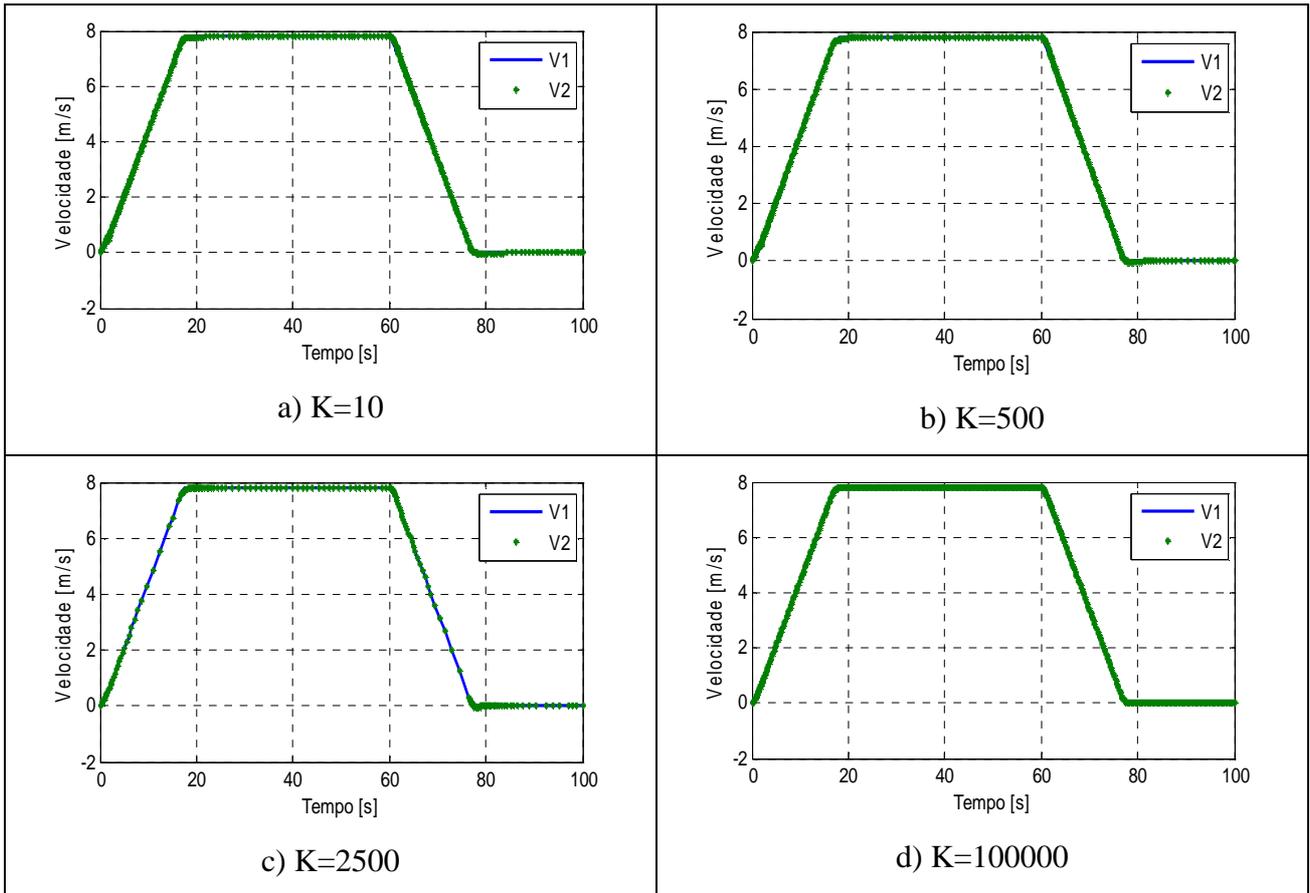


Figura. 4.34. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 2 b, REG = 1.

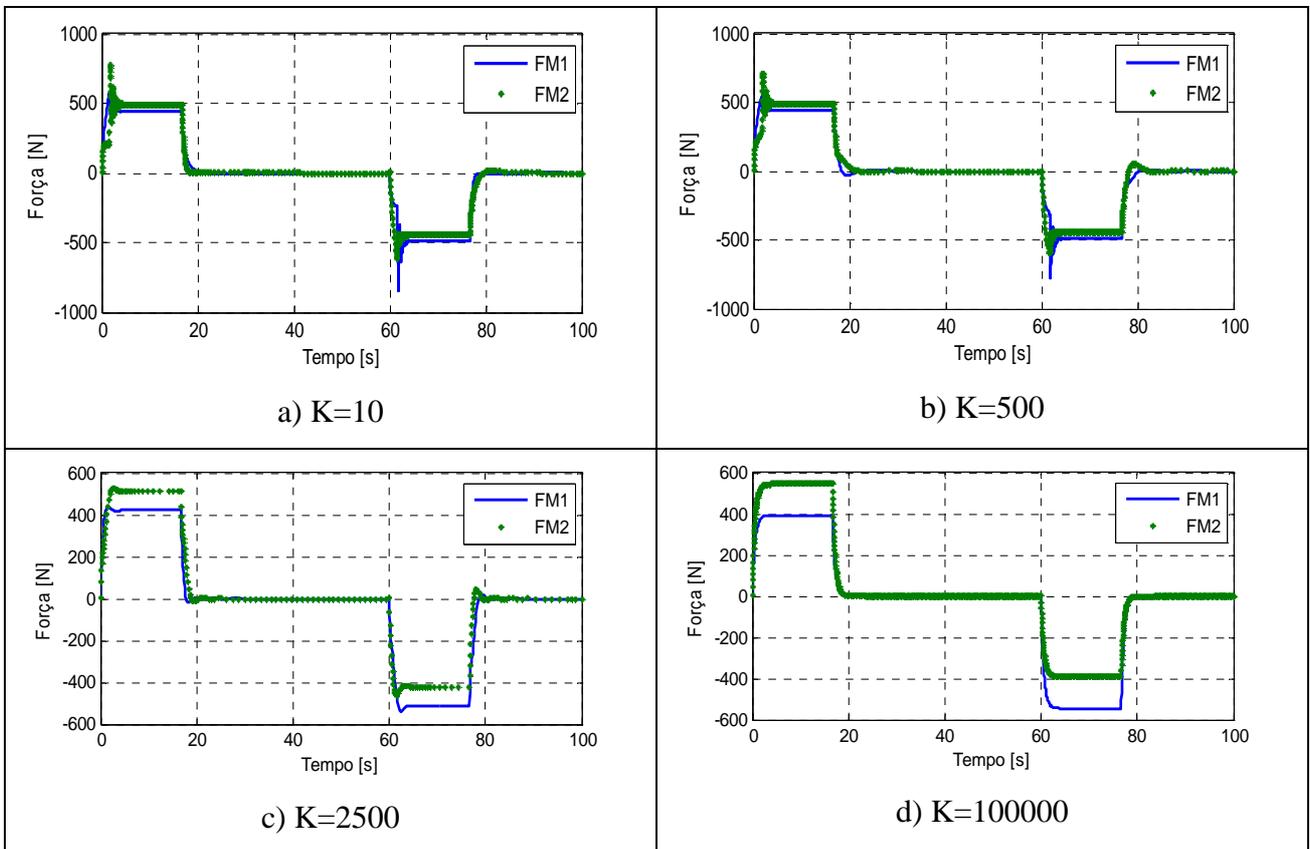


Figura. 4.35. Força 1 e Força 2, Caso 2 b, REG = 1.

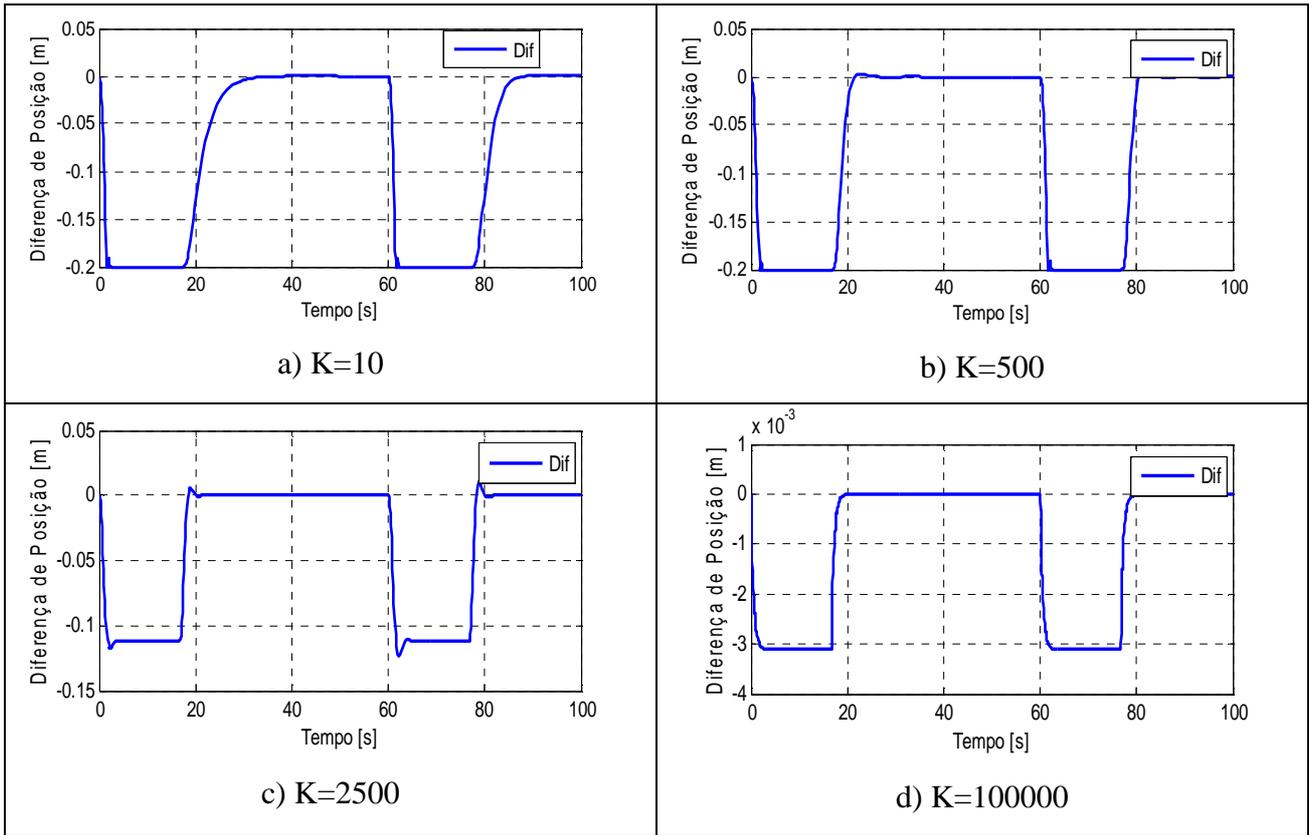


Figura. 4.36. Diferença de posição, Caso 2 b, REG = 1.

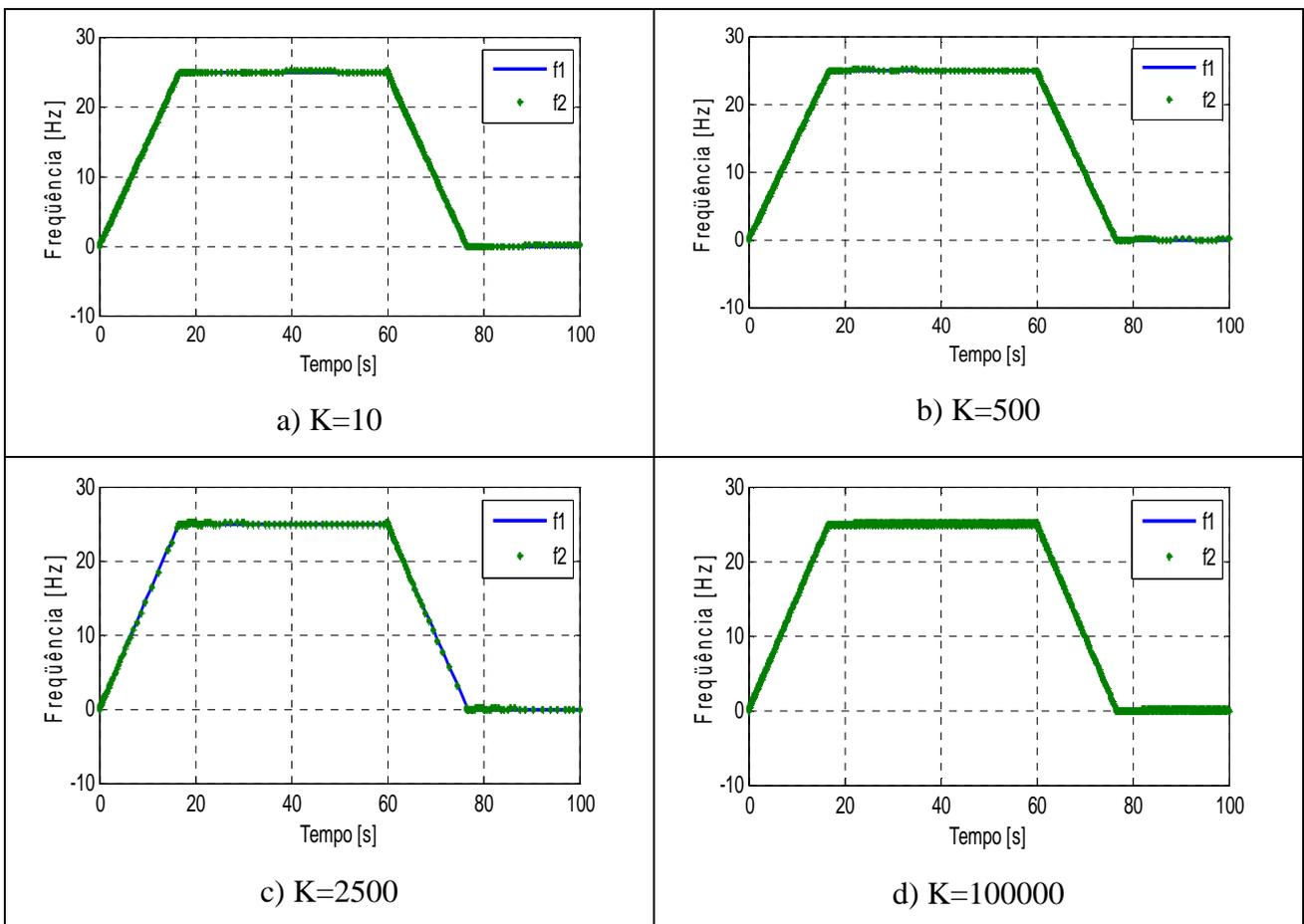


Figura. 4.37. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 2 b, REG = 1.

A variação de massa ocorre no segundo 30, depois que o trem atingiu sua velocidade nominal. Uma vez que a velocidade era constante, esta mudança de massa não provocou alteração na força. Na verdade, este caso é uma combinação das condições apresentadas em 1(d). A diferença de posição atinge os seus valores máximos e mínimos para os casos em que  $K= 100$  e  $500$ . Para compensar isto se sugere colocar um regulador proporcional com  $REG = 10$ . Os resultados mostram que a diferença de posição não atinge agora os valores extremos.

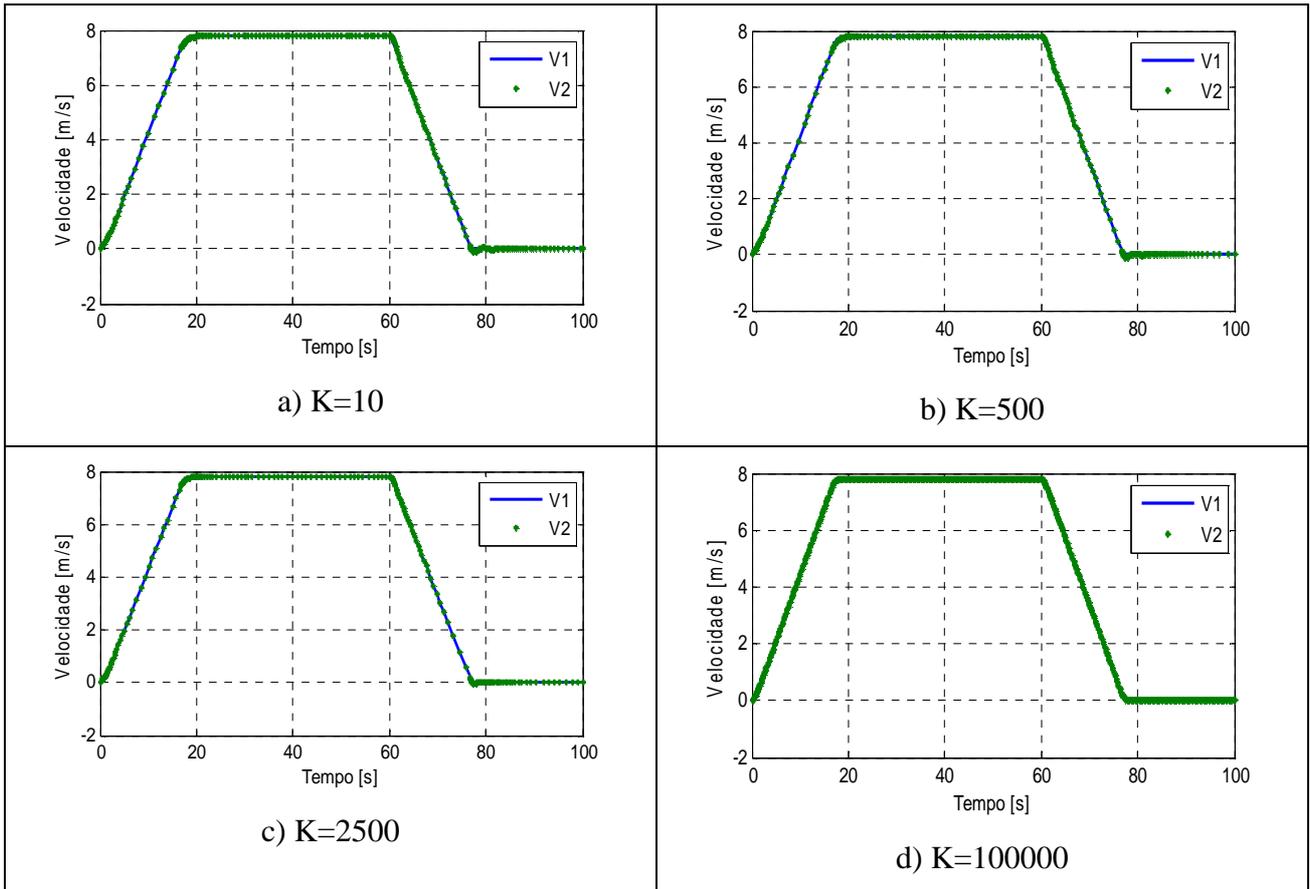


Figura. 4.38. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 2 b, REG = 10.

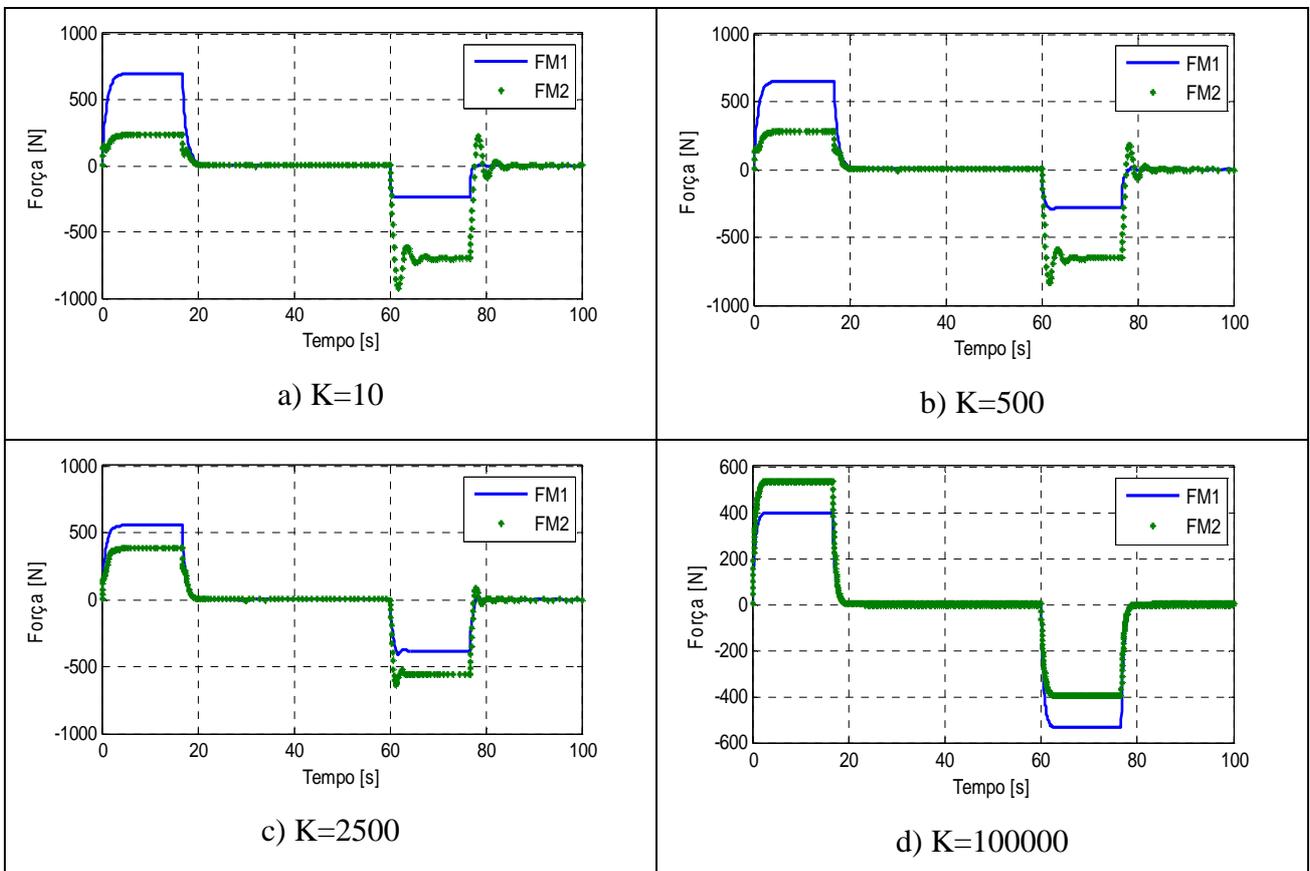


Figura. 4.39. Força 1 e Força 2, Caso 2 b, REG = 10.

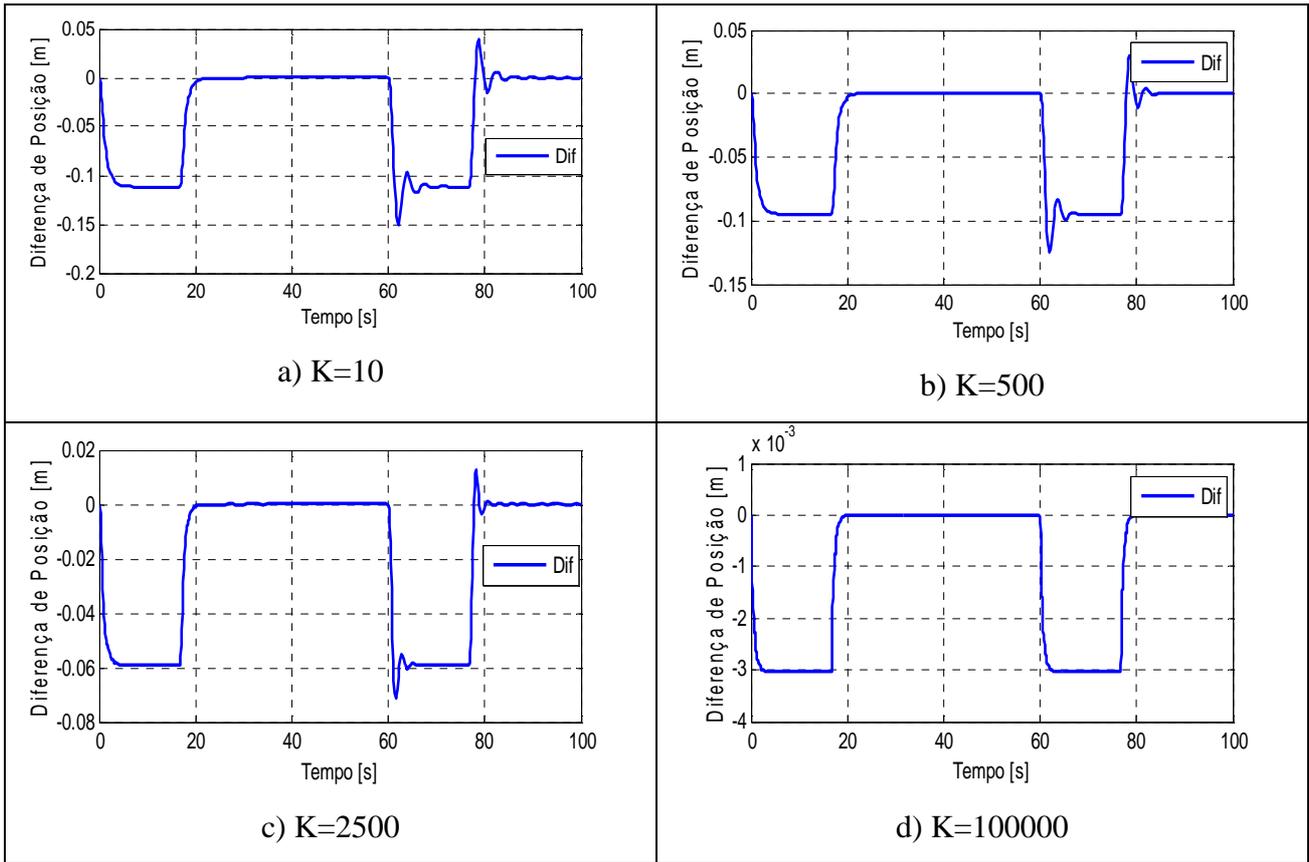


Figura. 4.40. Diferença de posição, Caso 2 b, REG = 10.

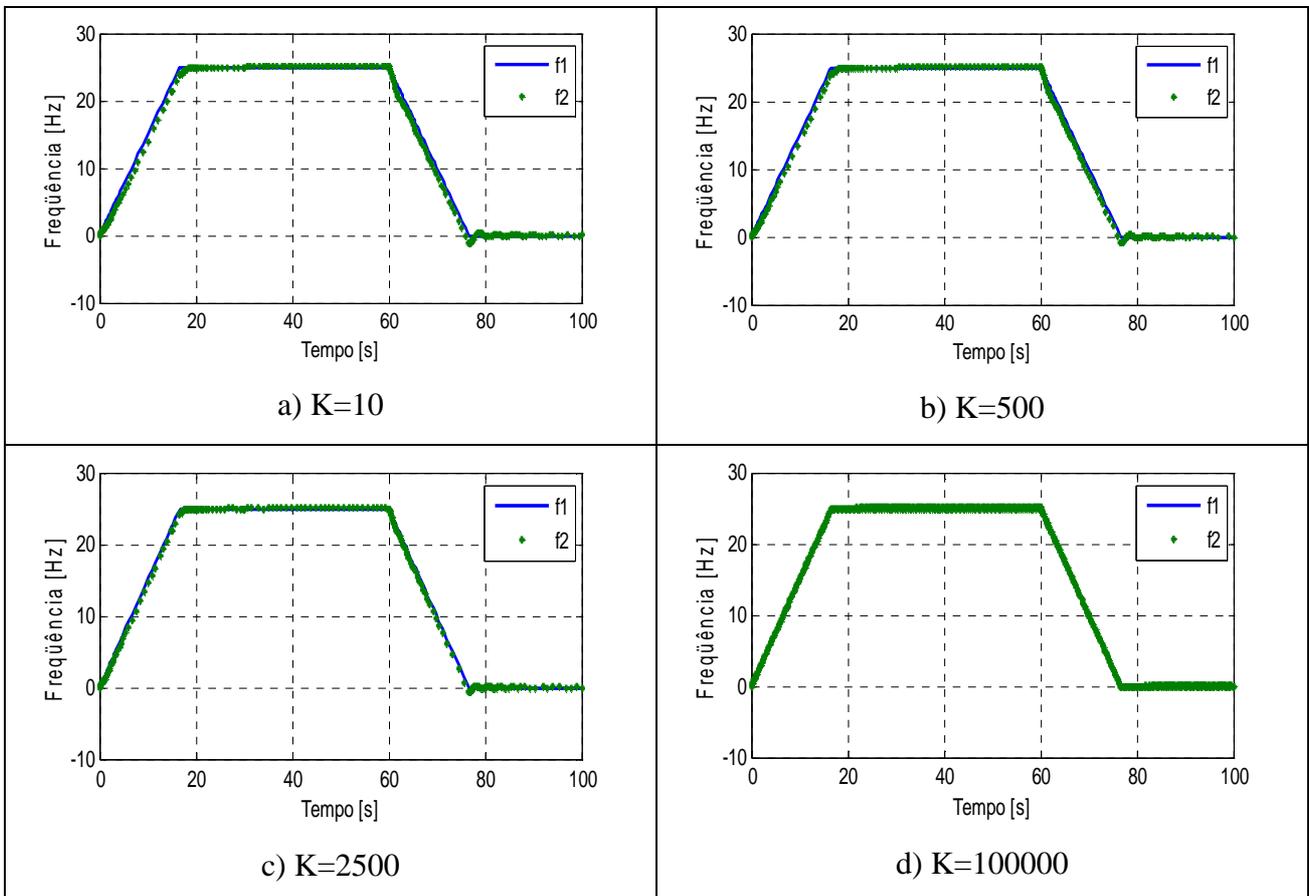


Figura. 4.41. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 2 b, REG = 10.

### 4.3.3. CASO 3 TRAJETÓRIA INCLINADA E VARIAÇÃO DE MASSA.

O MagLev-Cobra poderá operar sobre um plano inclinado, maior que o dos trens convencionais [13][14]. Portanto, neste estudo de simulação, depois do trem chegar na sua velocidade nominal, considerou-se que passa por um plano com declividade de 15% [15]. Isso ocorre no intervalo de tempo de 30 até 50 s. Nos casos (a) e (b), considerou-se que a massa é constante. Nos casos (c) e (d), considerou-se uma mudança de massa no instante 40 segundos. A tabela 4.3.resume os estudos desenvolvidos.

Tabela 4.3. Parâmetros para a simulação com trajetória inclinada.

Caso	M1 [kg]	M2 [kg]	K [N/m]	Ganho1 [Ns/m]	Ganho2 [Ns/m]	P [%]	Observações
<b>3a</b>	500	1500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	2157	1549	15	M1 ≠ M2, Módulo 1, sem passageiros.
<b>3b</b>	1500	500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	1549	2157	15	M1 ≠ M2, Módulo 2, sem passageiros.
<b>3c</b>	500 até 1500	1500 até 500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	variável	Variável	15	passageiros movem-se do módulo 2 ao módulo 1.
<b>3d</b>	1500 até 500	500 até 1500	[10,500,2500,10 <sup>5</sup> ]	variável	Variável	15	passageiros movem-se do módulo 1 ao módulo 2.

Apresentam-se as simulações feitas para um regulador proporcional onde REG=1 e os resultados são mostrados nas seguintes figuras, considerou-se uma pendente de 15% (equivalente a 8,63°):

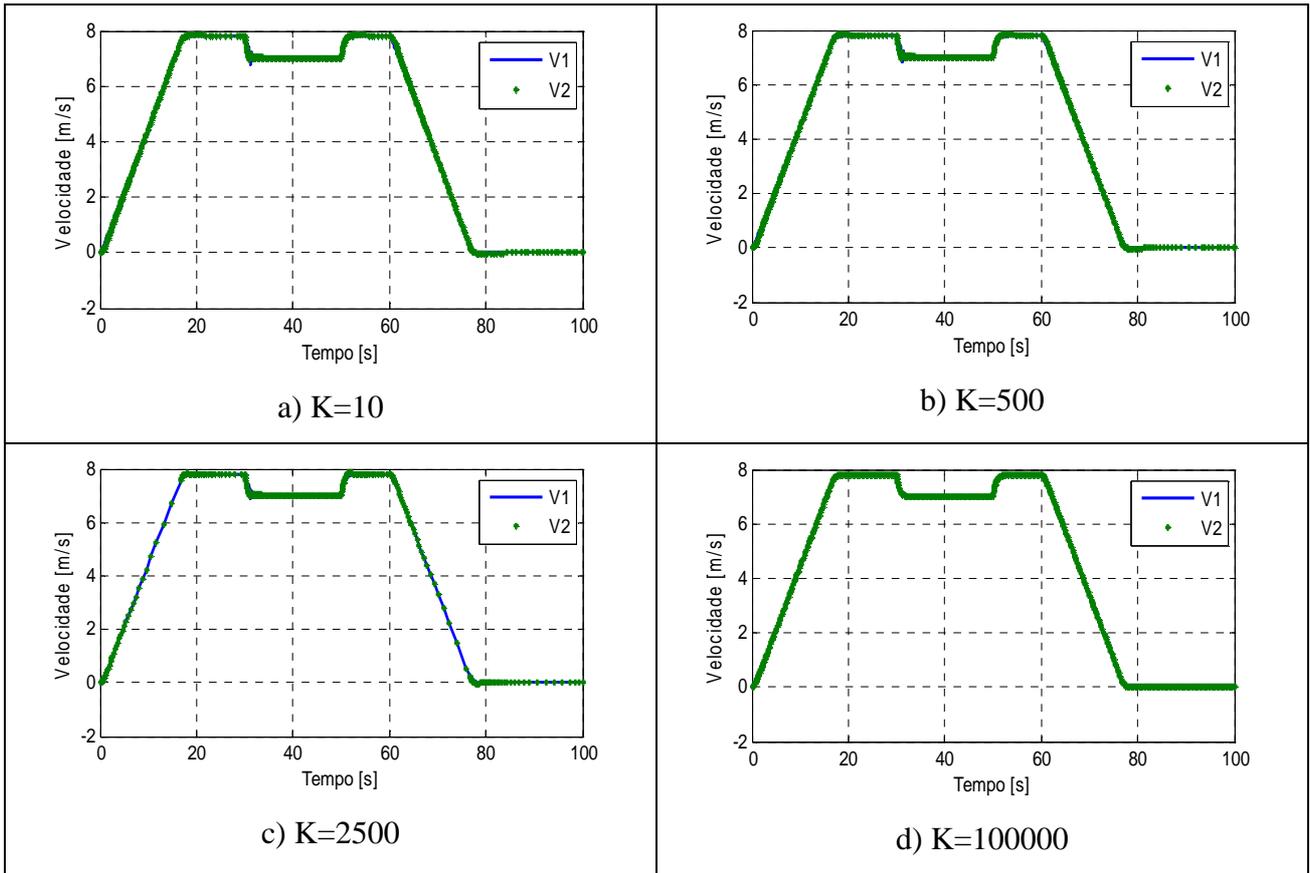


Figura. 4.42. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 a, REG = 1.

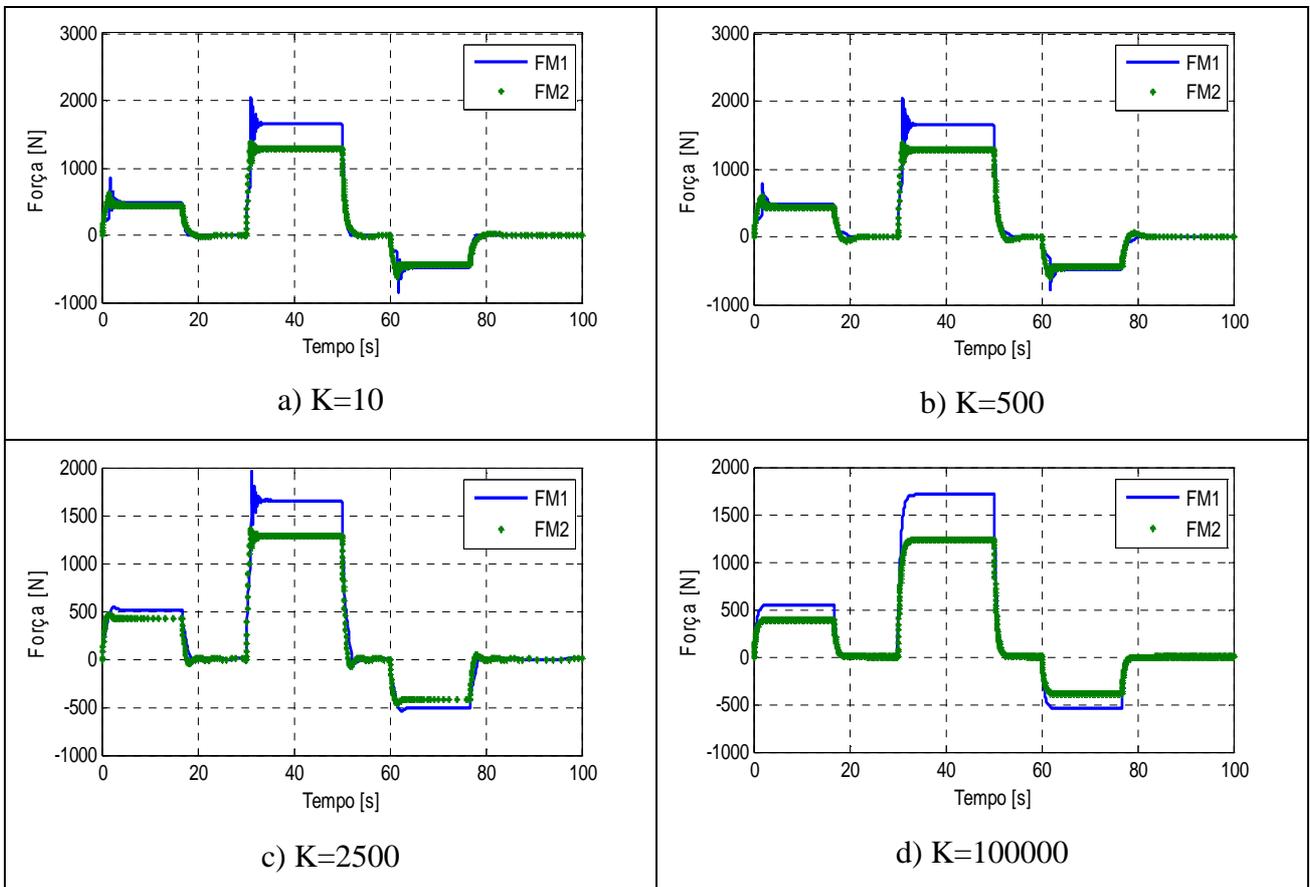


Figura. 4.43. Força 1 e Força 2, Caso 3 a, REG = 1.

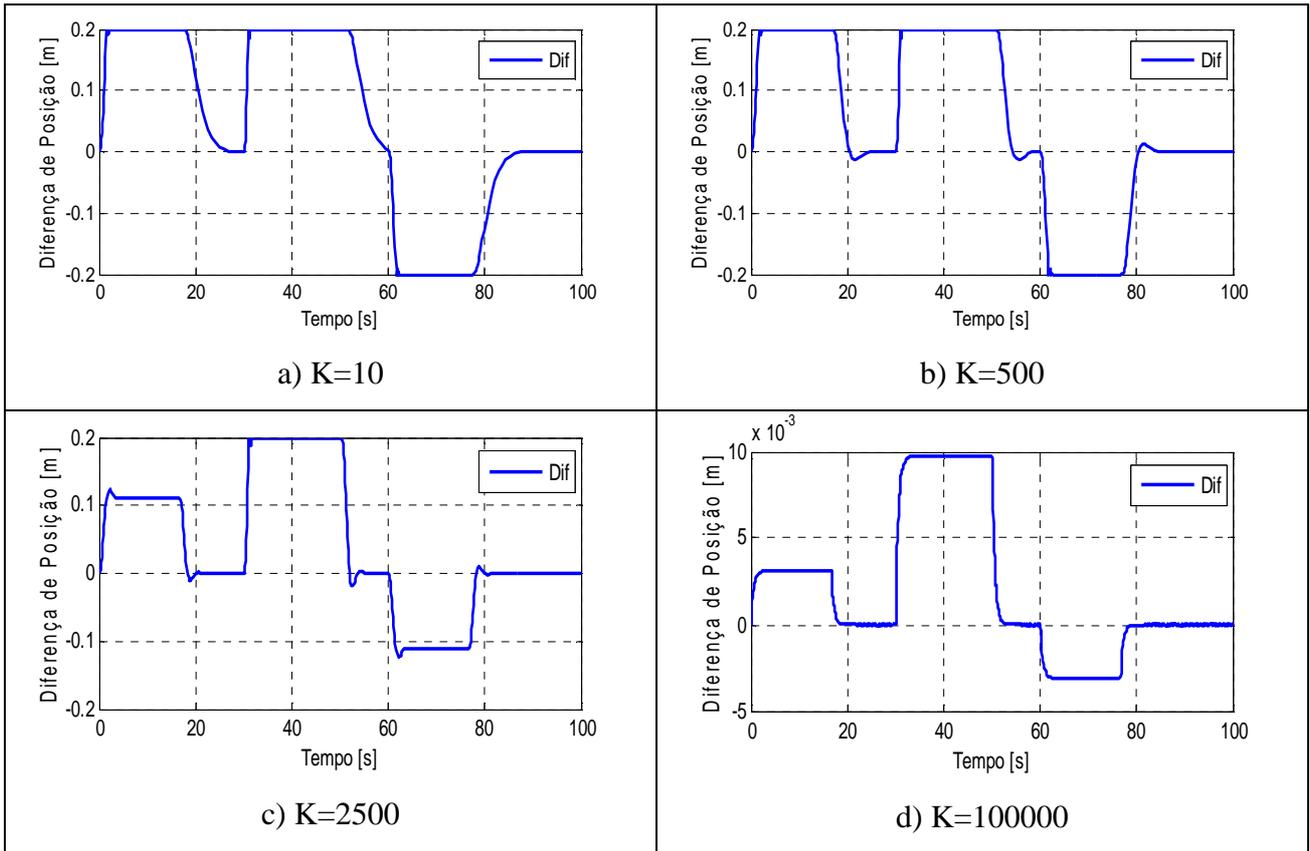


Figura. 4.44. Diferença de posição, Caso 3 a, REG = 1.

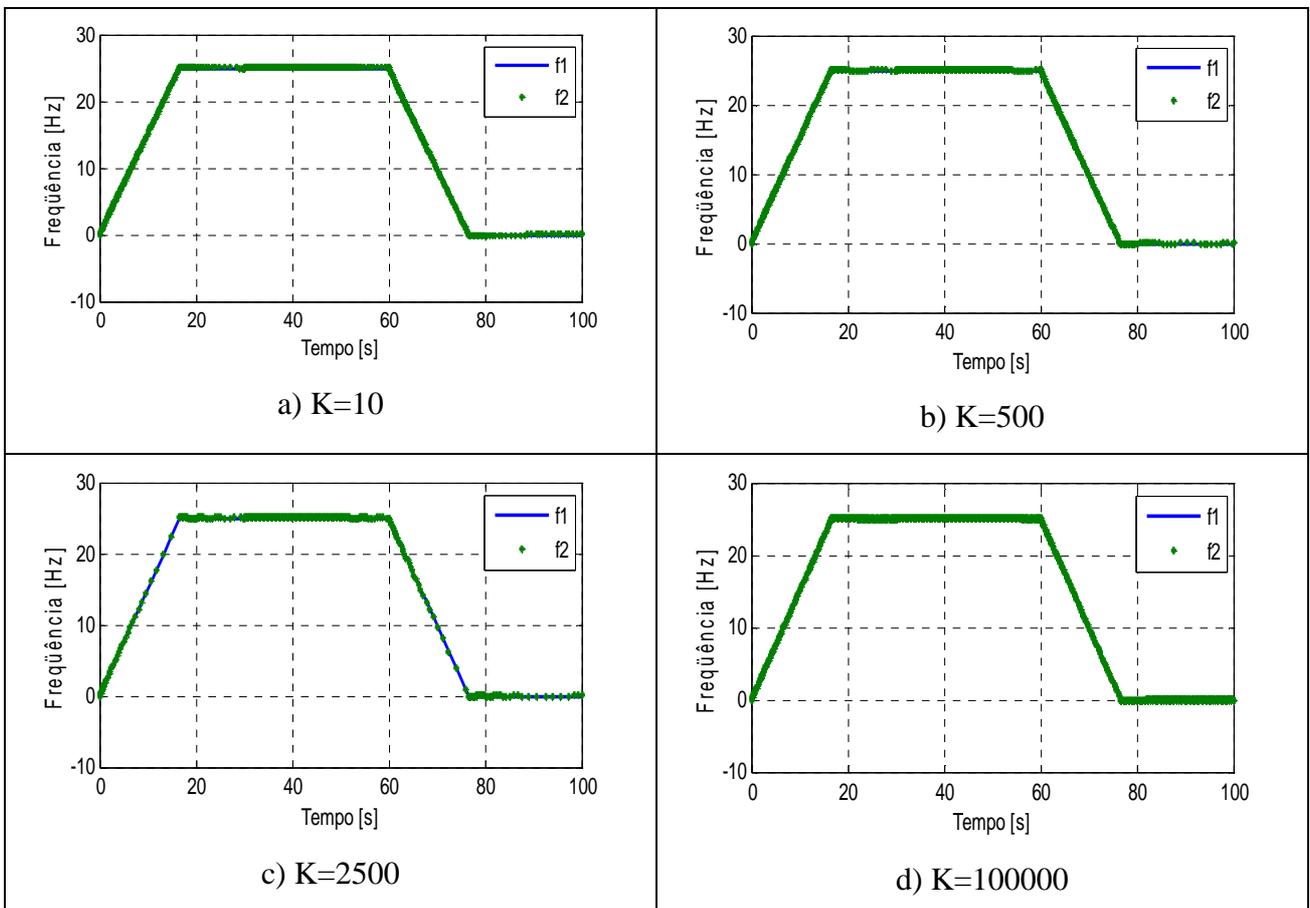


Figura. 4.45. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 a, REG = 1.

Para o caso 3(a), verifica-se que os limites máximos e mínimos são atingidos em  $K=10$ ,  $K=500$  e  $K=2500$ . Para compensar isto se sugere colocar um regulador proporcional com  $REG = 10$ . Verifica-se, a seguir, que mesmo assim, os limites são atingidos durante a rampa.

O caso 3(a) é igual ao 1(c) até o tempo 20s.

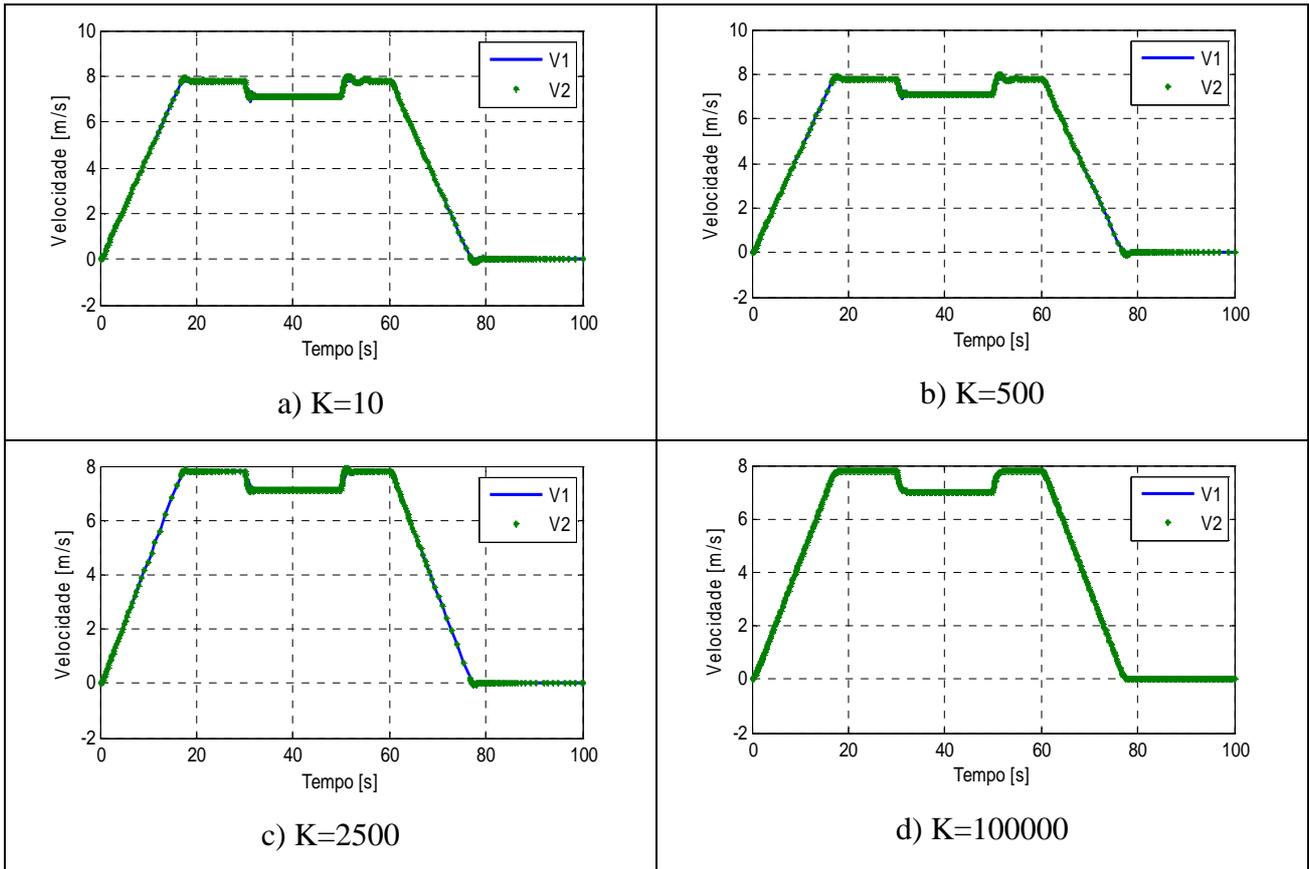


Figura. 4.46. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 a, REG = 10.

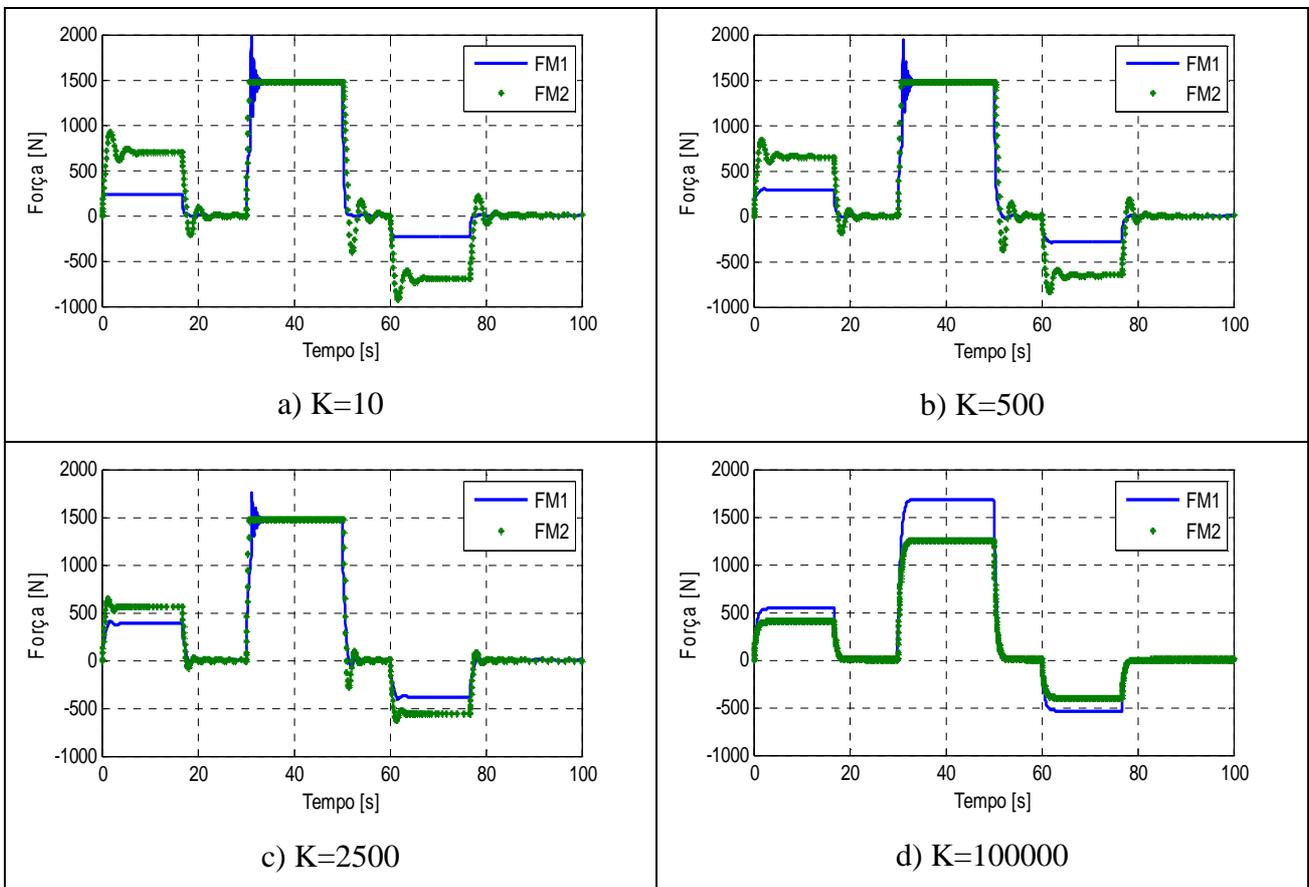


Figura. 4.47. Força 1 e Força 2, Caso 3 a, REG = 10.

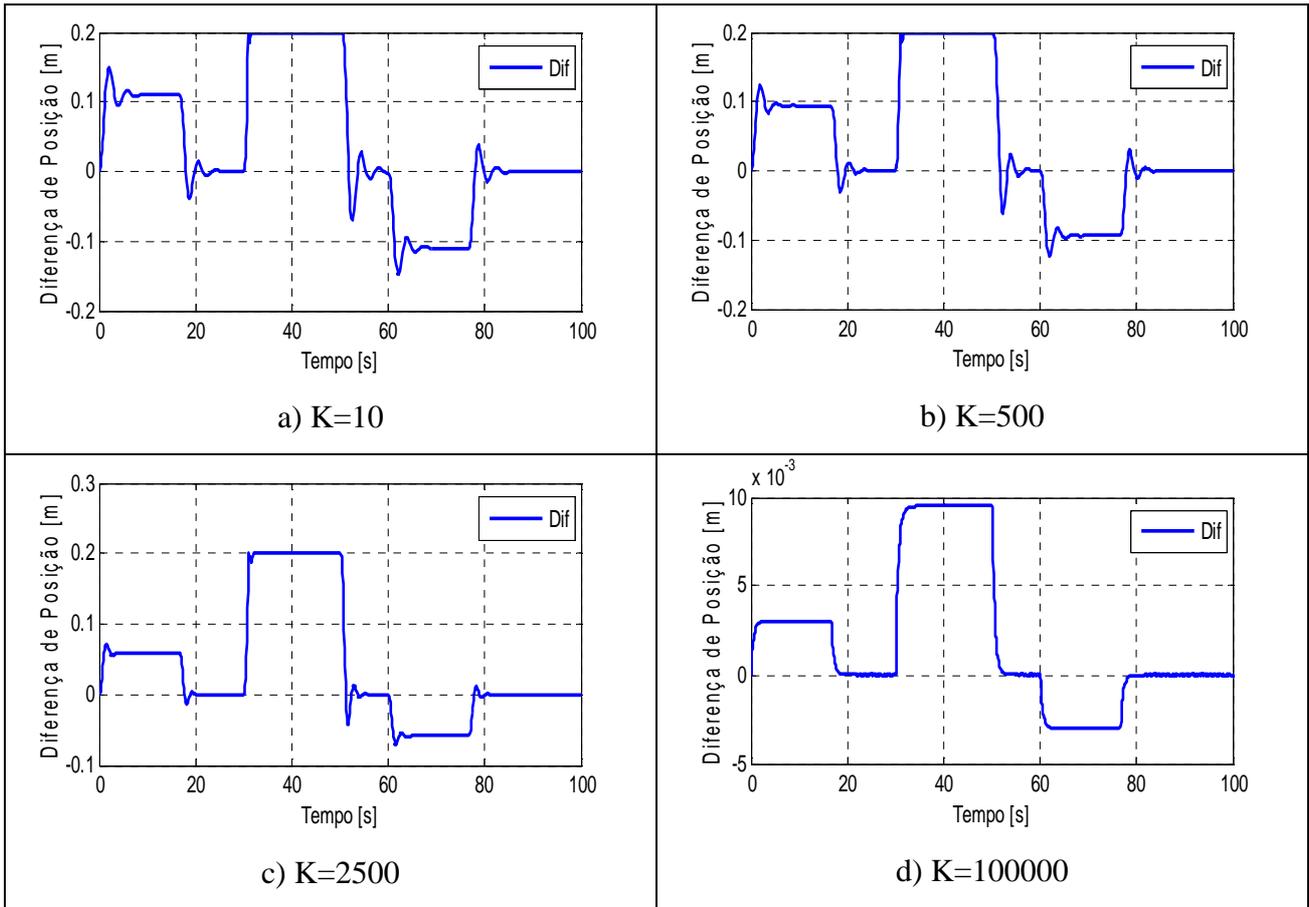


Figura. 4.48. Diferença de posição, Caso 3 a, REG = 10.

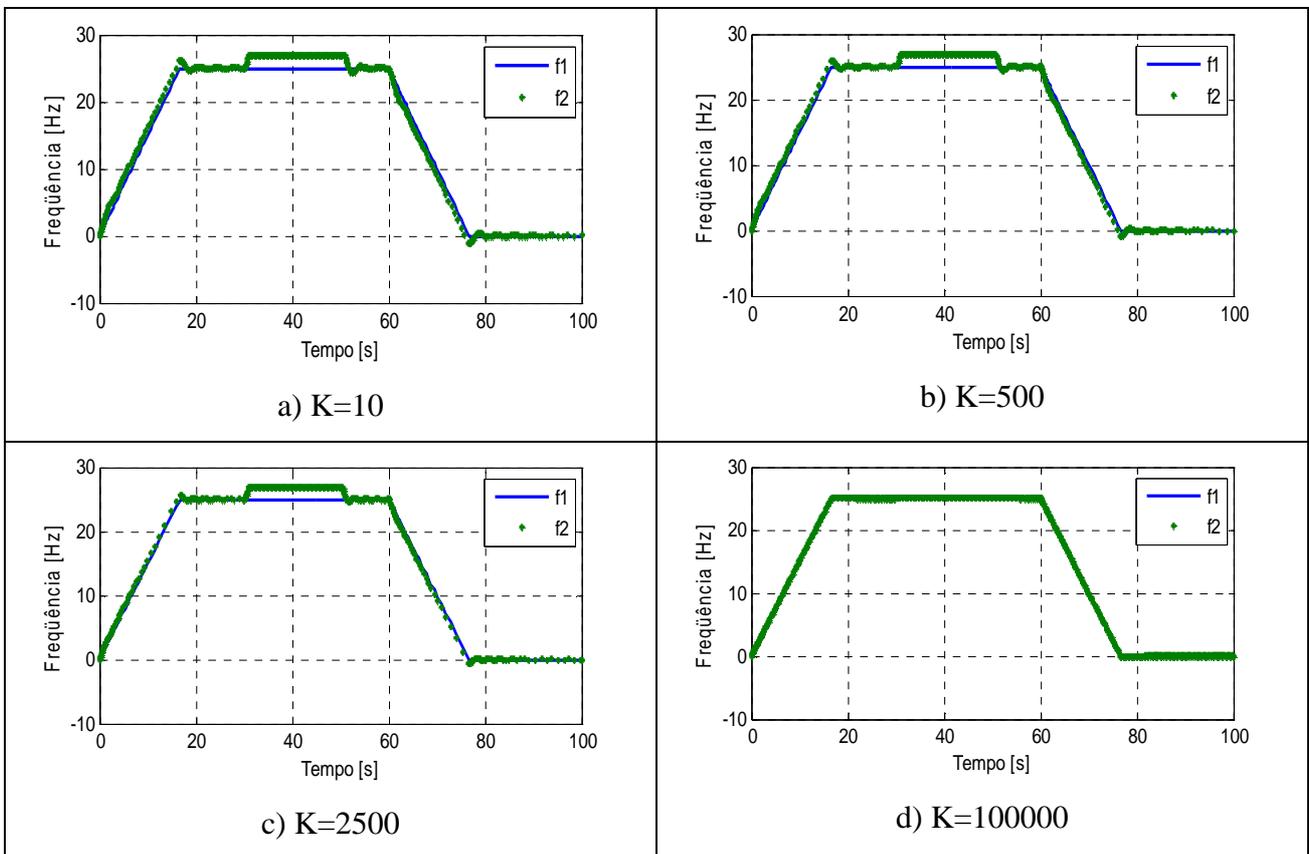


Figura. 4.49. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 a, REG = 10.

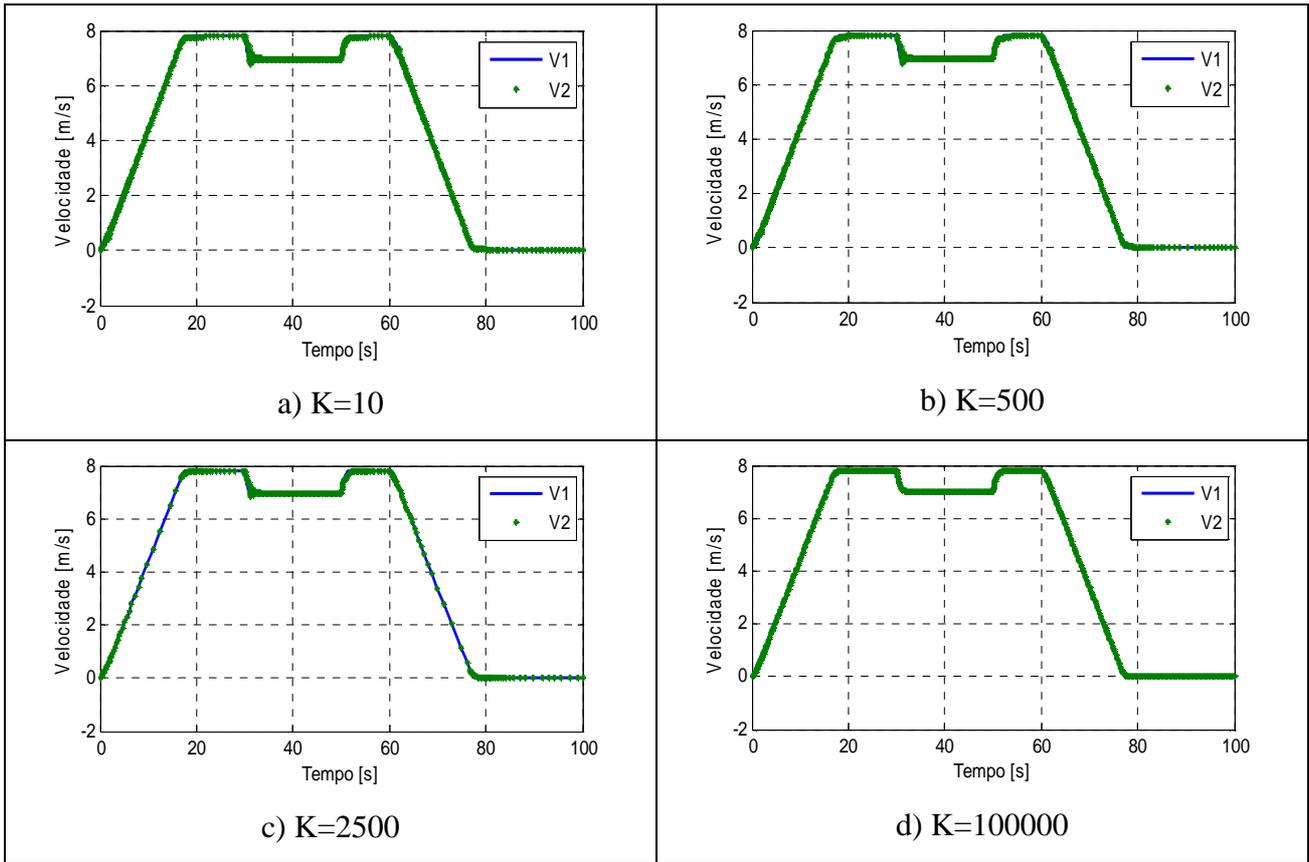


Figura. 4.50. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 b, REG = 1.

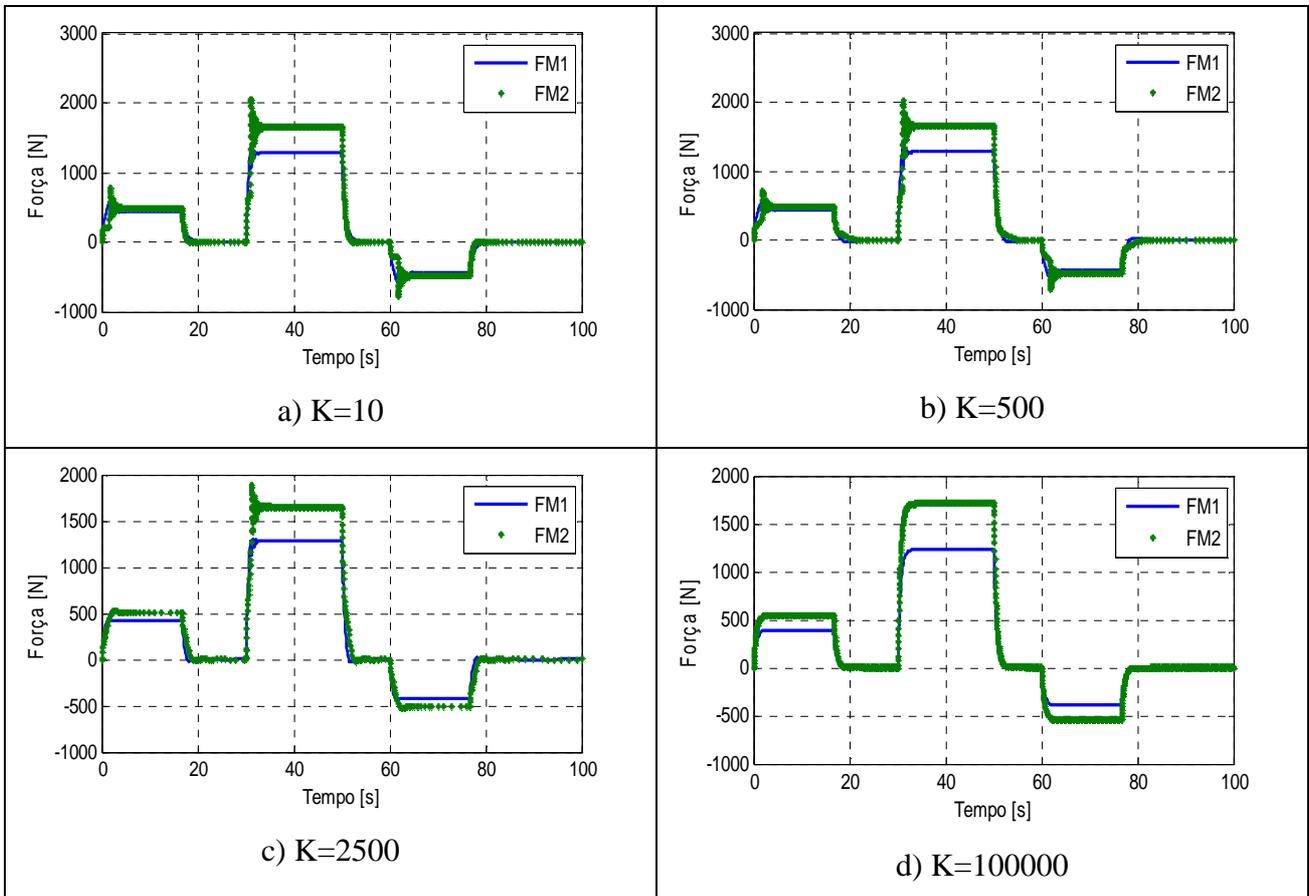


Figura. 4.51. Força 1 e Força 2, Caso 3 b, REG = 1.

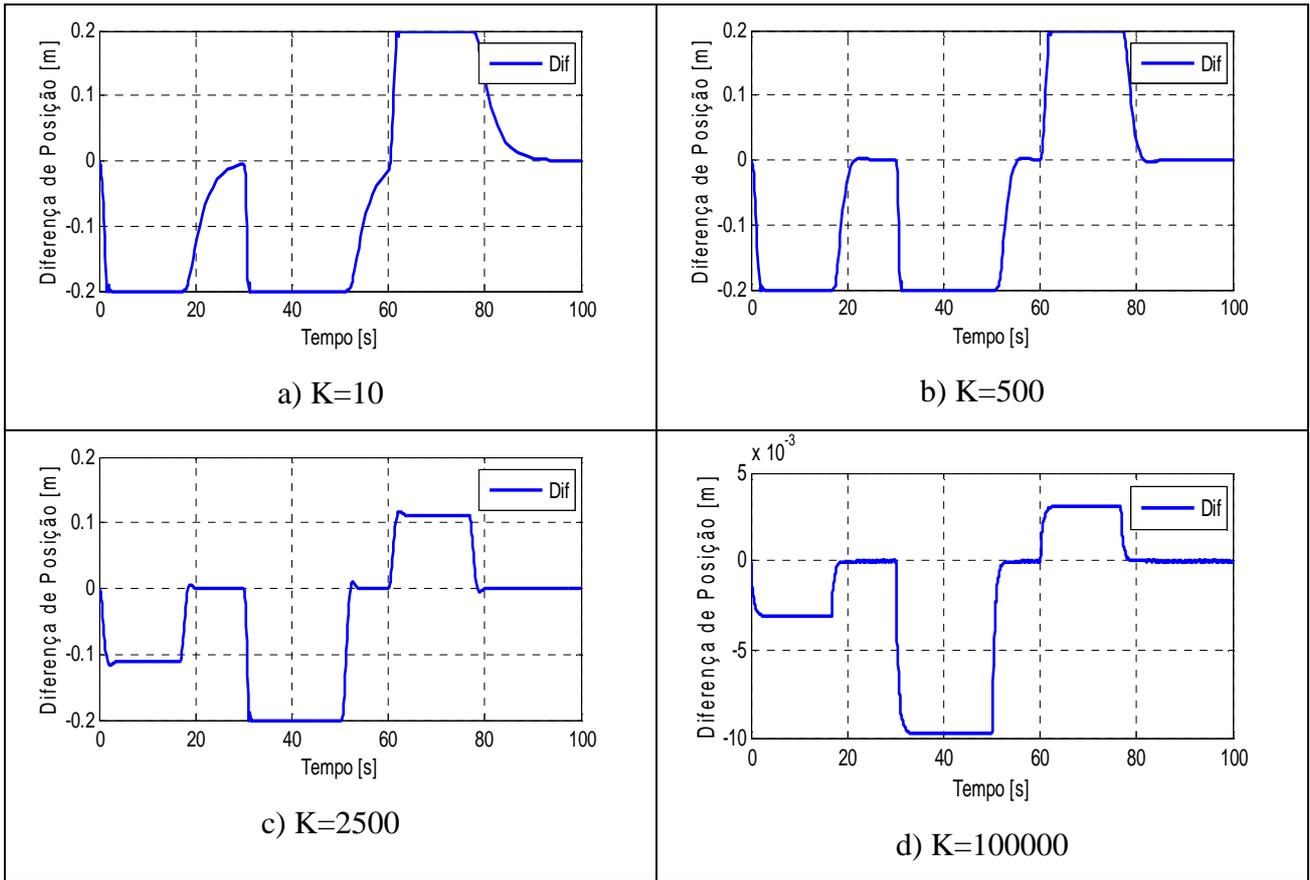


Figura. 4.52. Diferença de posição, Caso 3 b, REG = 1.

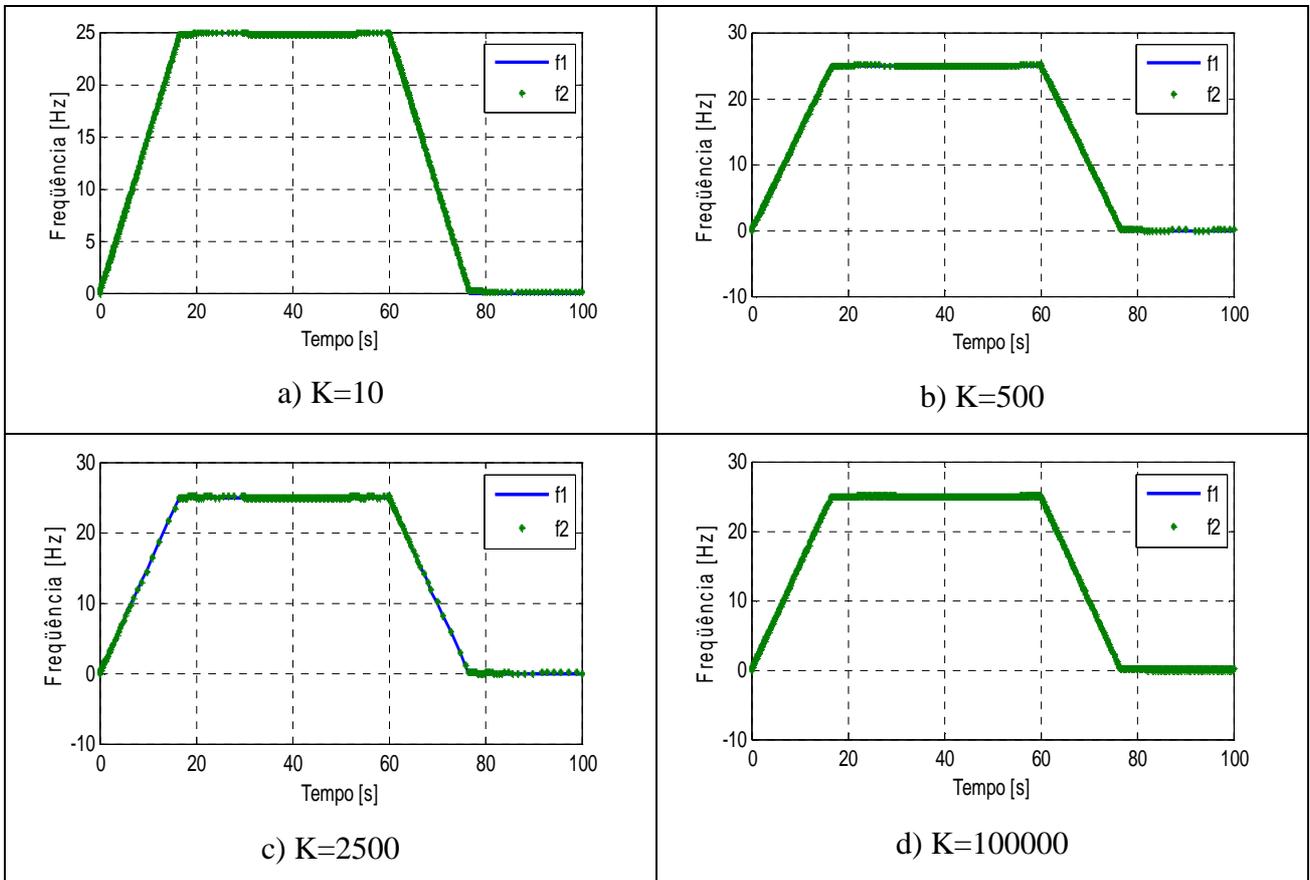


Figura. 4.53. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 b, REG = 1.

Para o caso 3(b), verifica-se que os limites máximos e mínimos são atingidos em  $K=10$ ,  $K=500$  e  $K=2500$ . Para compensar isto se sugere colocar um regulador proporcional com  $REG = 10$ . Verifica-se, a seguir, que mesmo assim, os limites são atingidos durante a rampa.

O caso 3(b) é igual ao 1(d) até o tempo 20s.

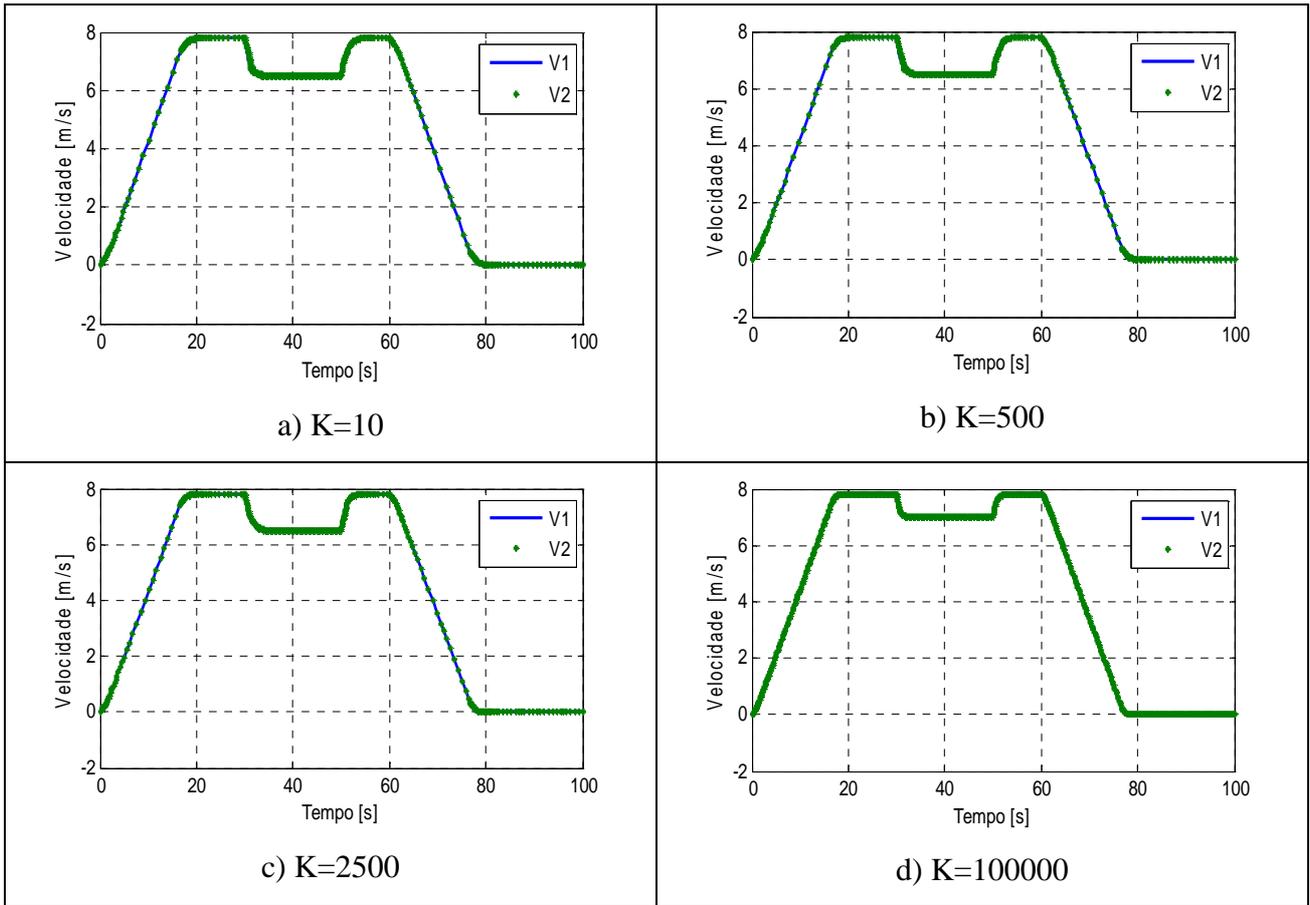


Figura. 4.54. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 b, REG = 10.

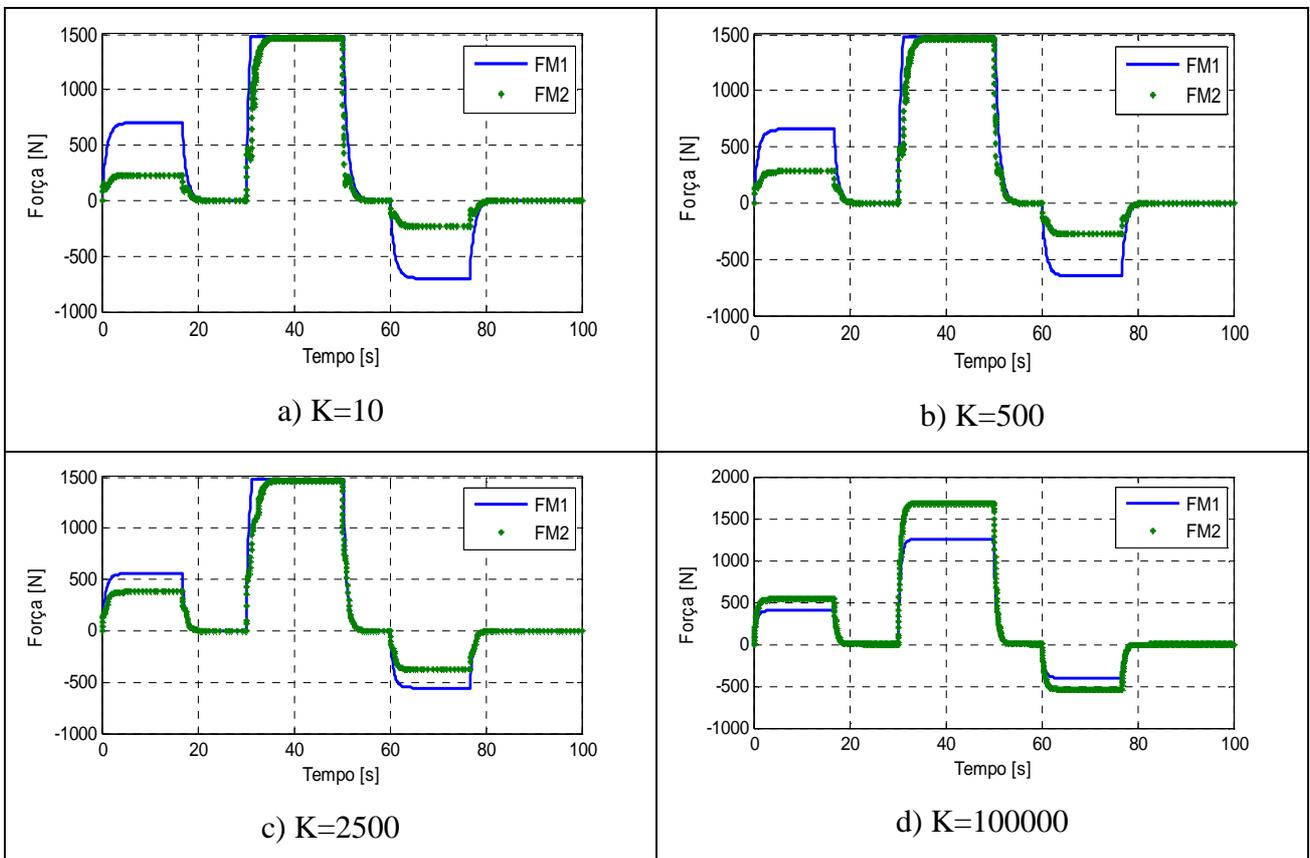


Figura. 4.55. Força 1 e Força 2, Caso 3 b, REG = 10.

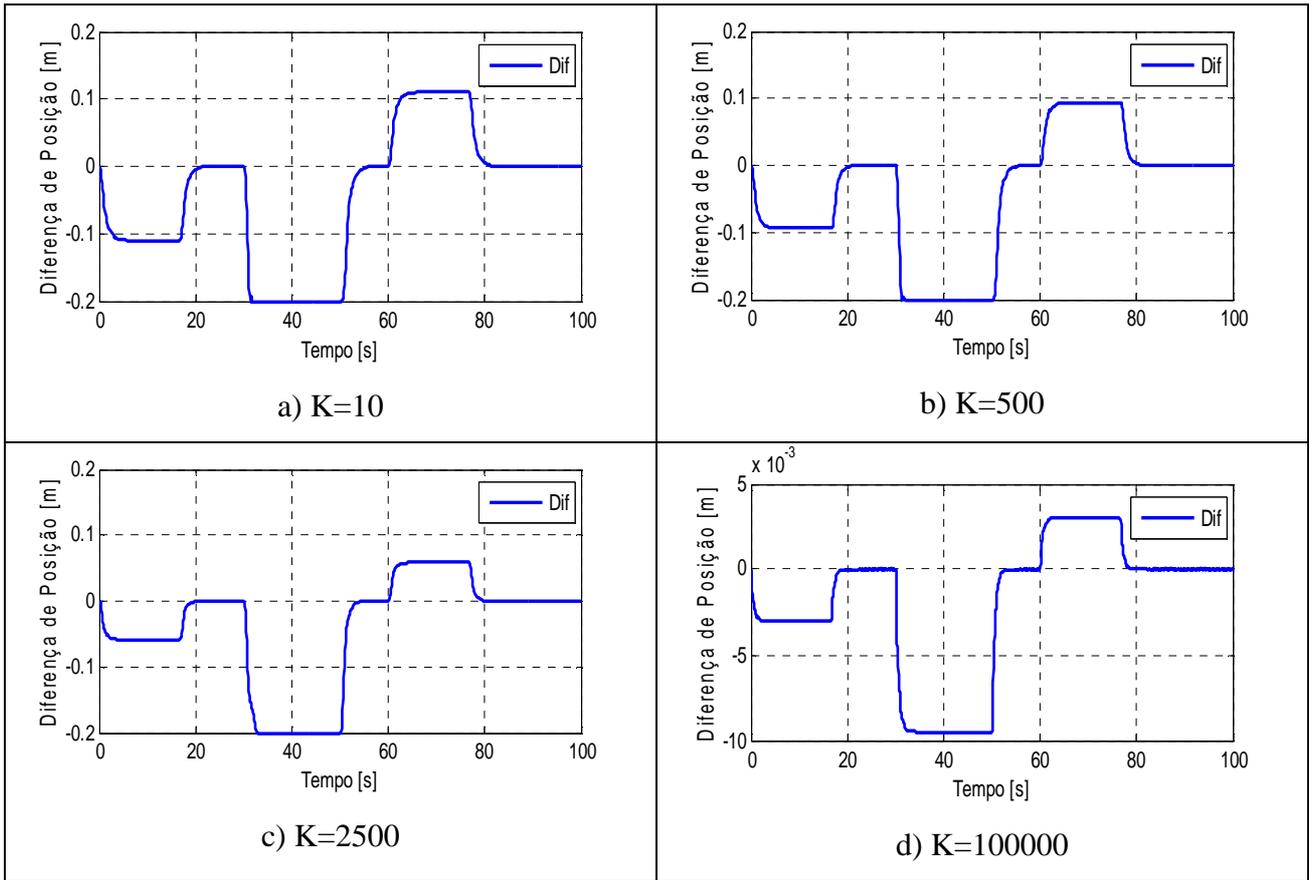


Figura. 4.56. Diferença de posição, Caso 3 b, REG = 10.

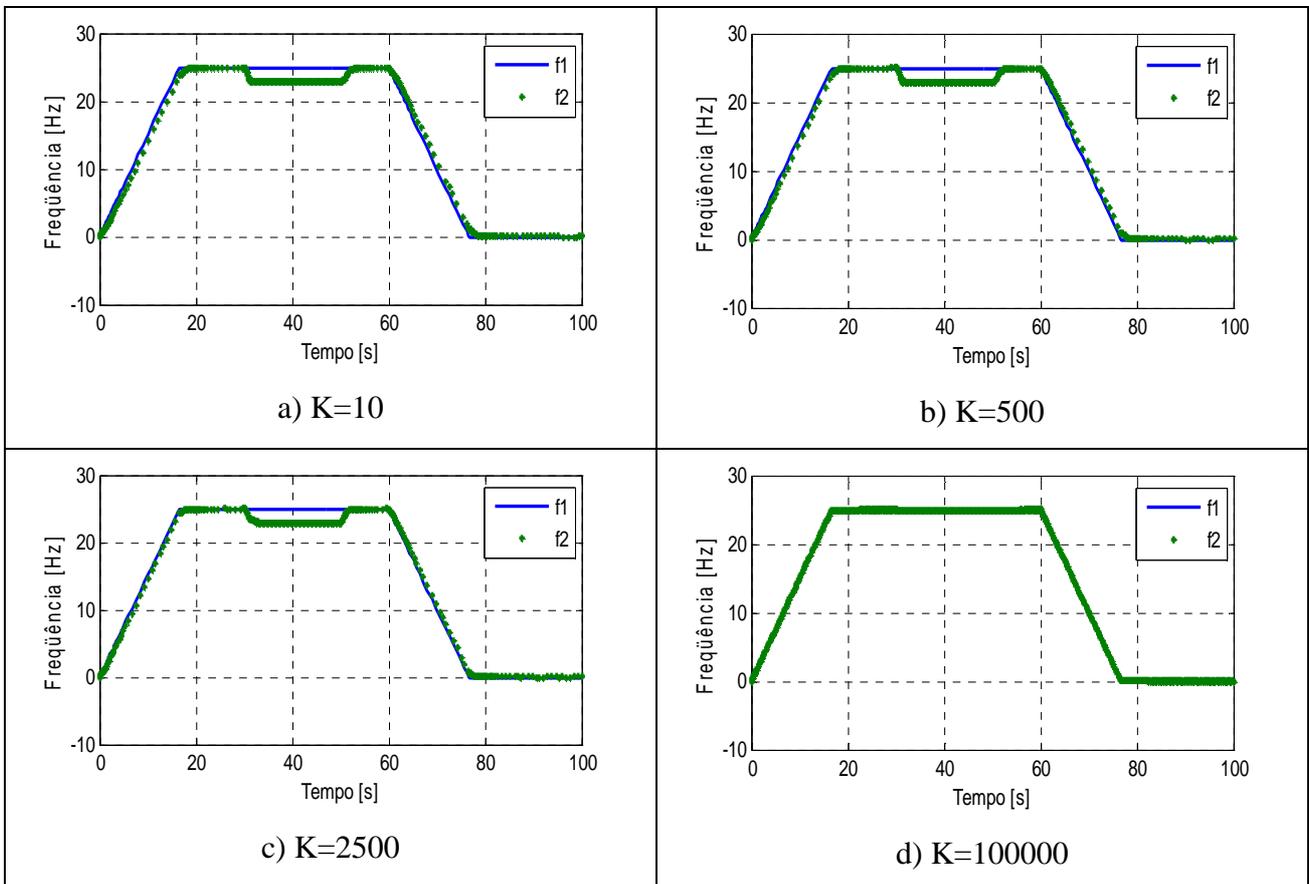


Figura. 4.57. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 b, REG = 10.

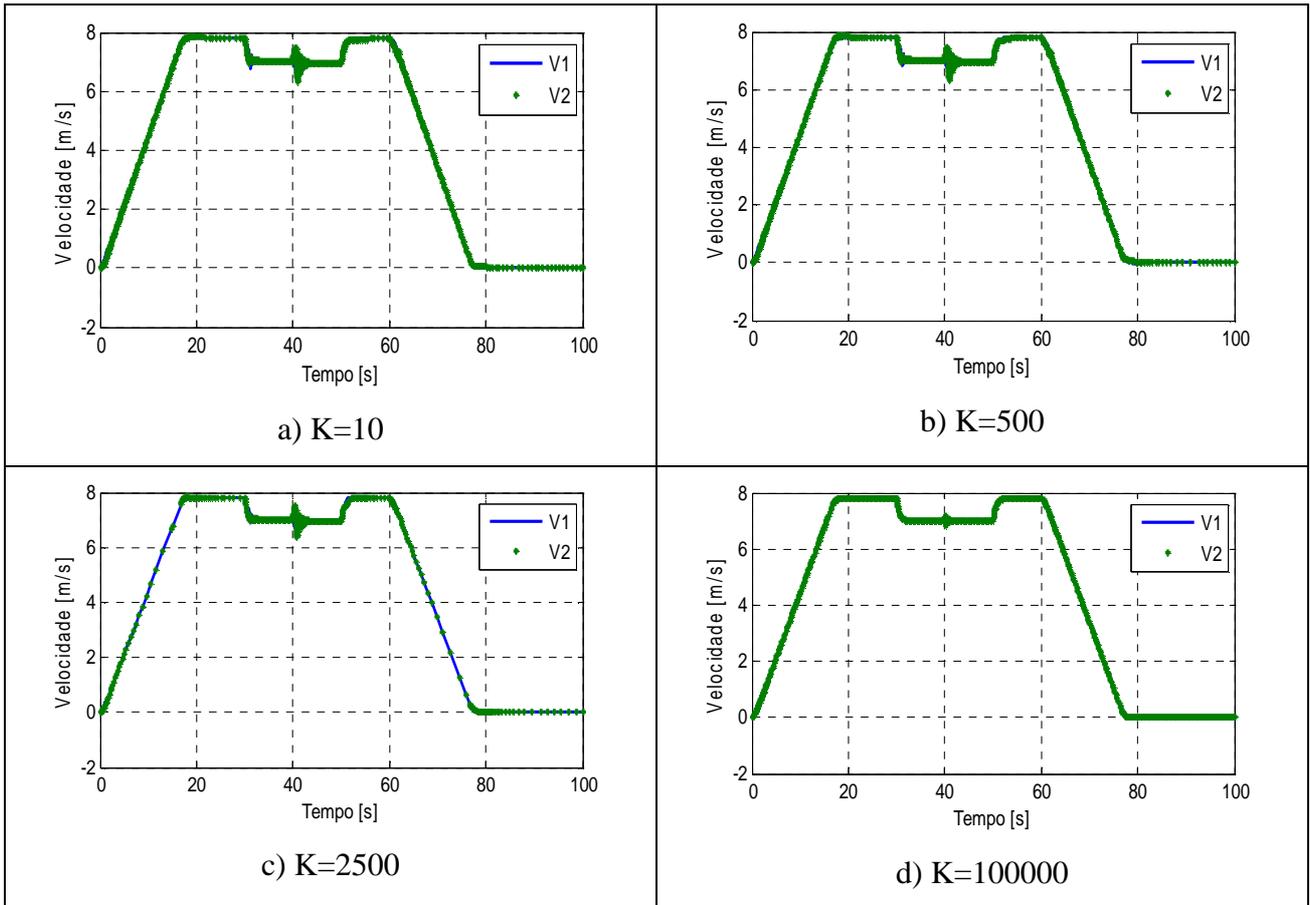


Figura. 4.58. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 c, REG = 1.

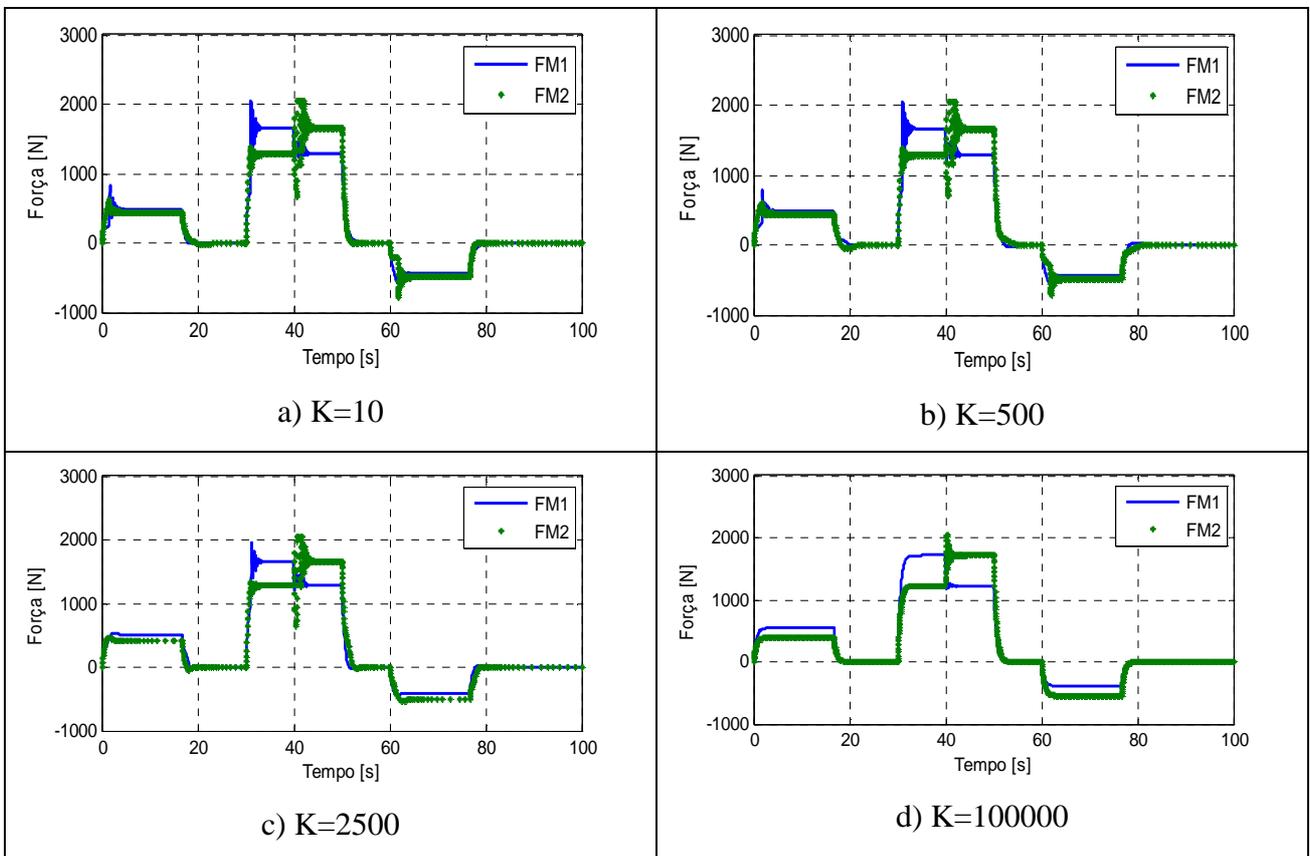


Figura. 4.59. Força 1 e Força 2, Caso 3 c, REG = 1.

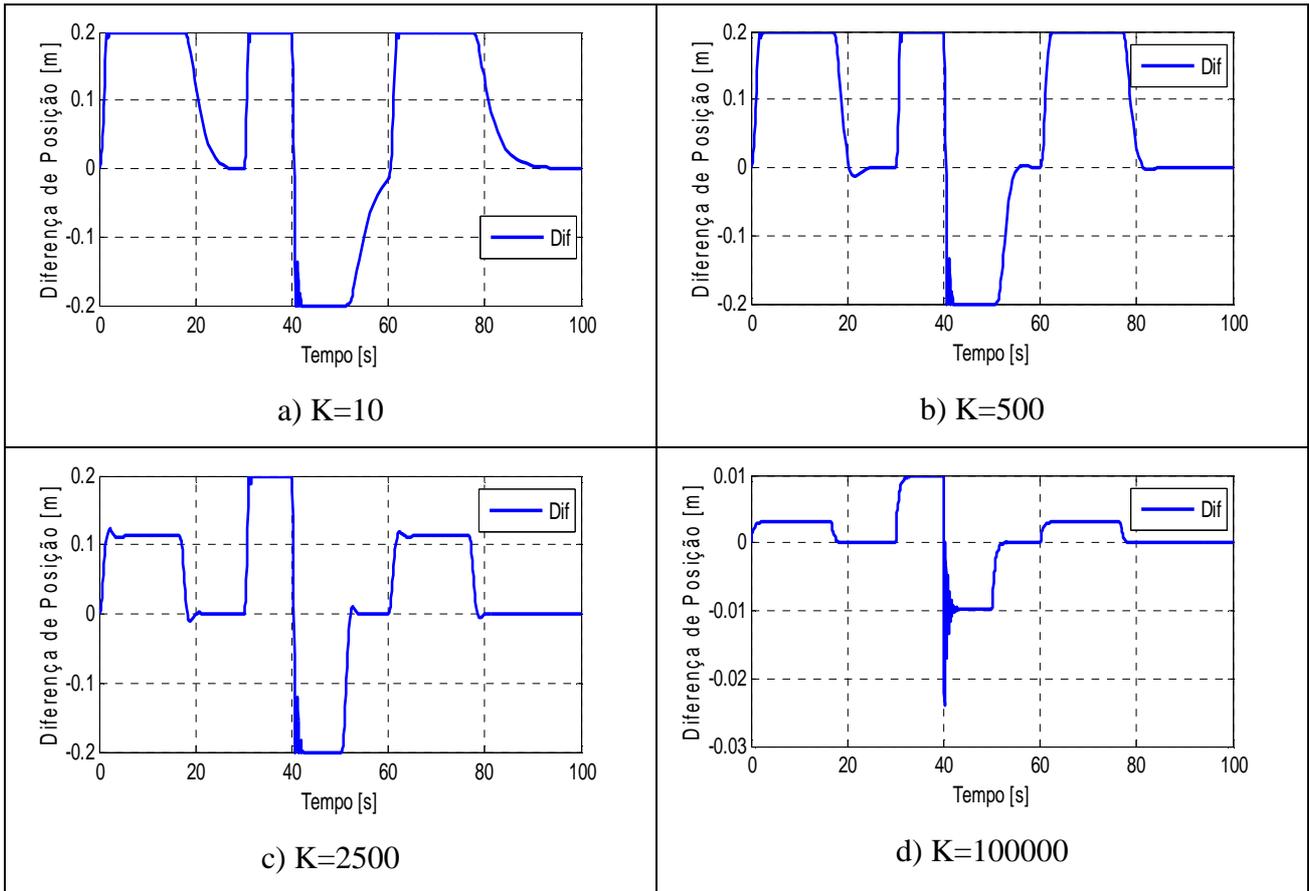


Figura. 4.60. Diferença de posição, Caso 3 c, REG = 1.

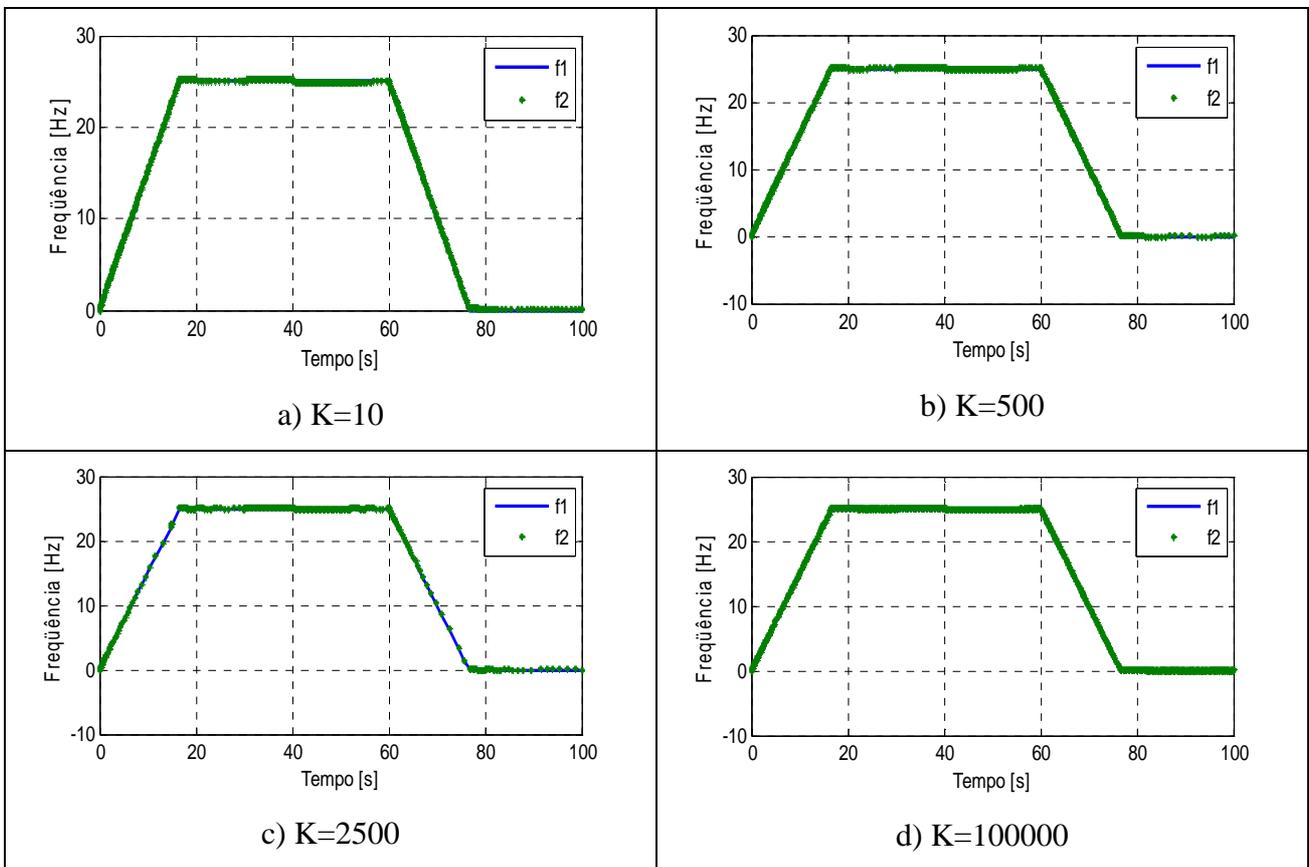


Figura. 4.61. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 c, REG = 1.

Para o caso 3(c), verifica-se que os limites máximos e mínimos são atingidos em  $K=10$ ,  $K=500$  e  $K=2500$ . Para compensar isto se sugere colocar um regulador proporcional com  $REG = 10$ . Verifica-se, a seguir, que mesmo assim, os limites são atingidos durante a rampa.

O caso 3(c) é igual ao 1(c) até o tempo 20s.

A variação de massa no tempo 40 segundos provoca uma oscilação na força, diferentemente do que aconteceu no caso 2.

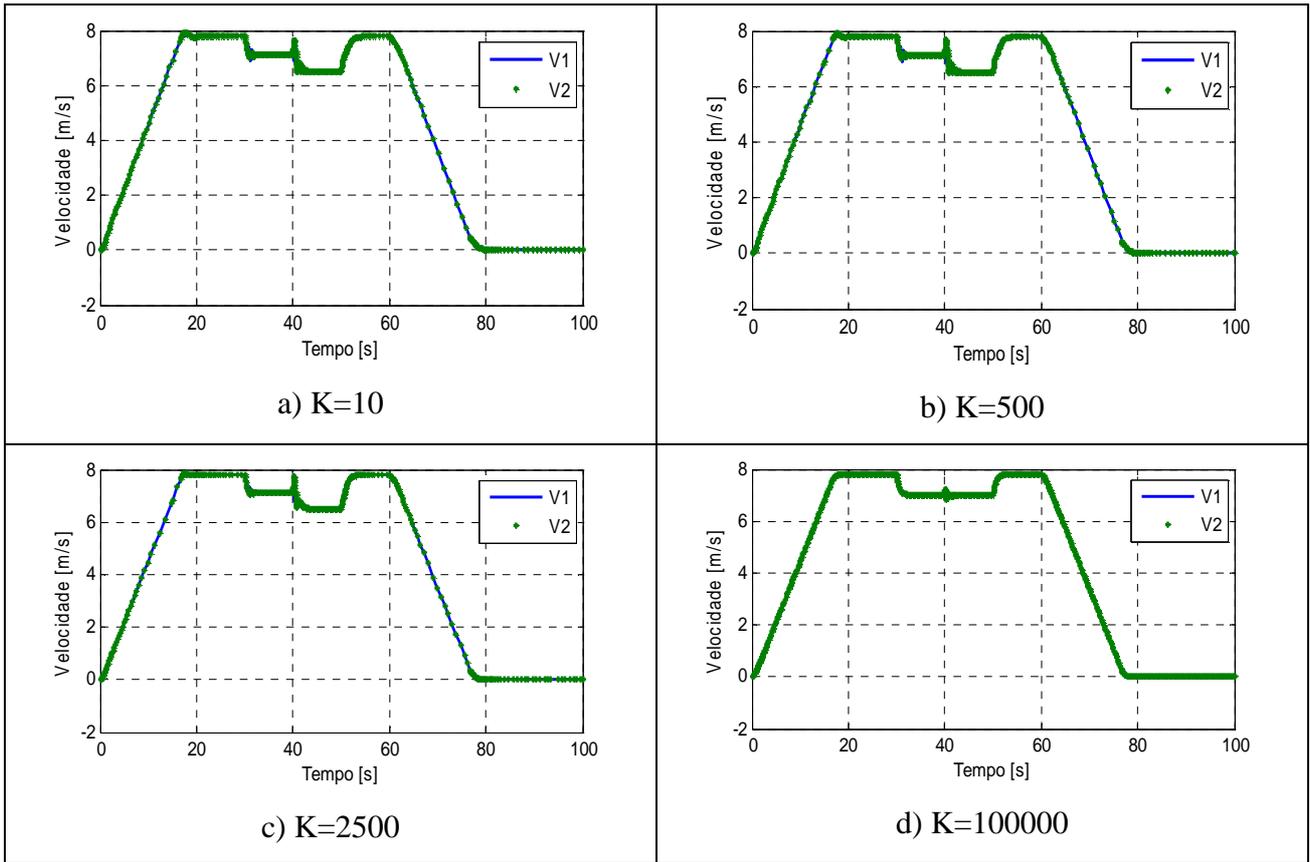


Figura. 4.62. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 c, REG = 10.

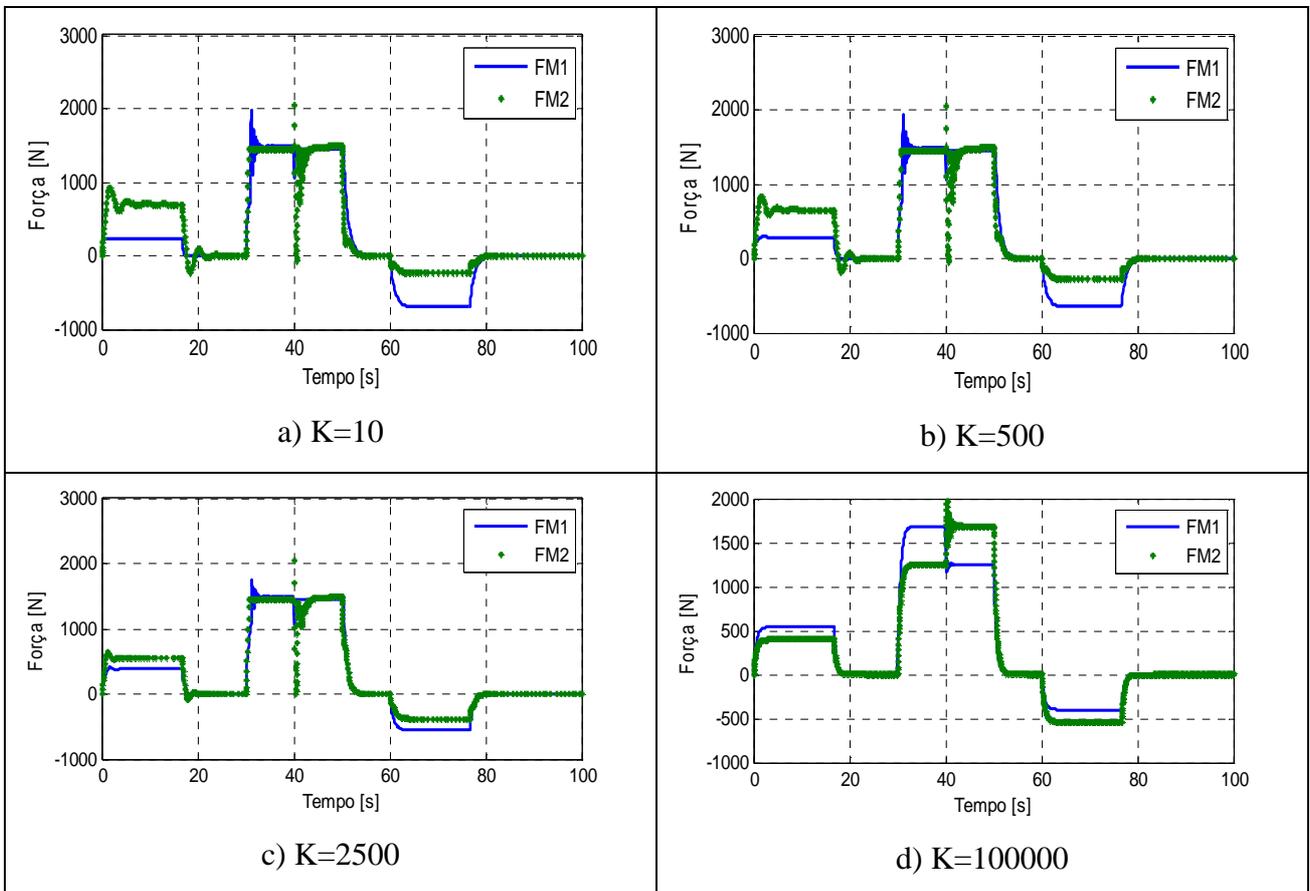


Figura. 4.63. Força 1 e Força 2, Caso 3 c, REG = 10.

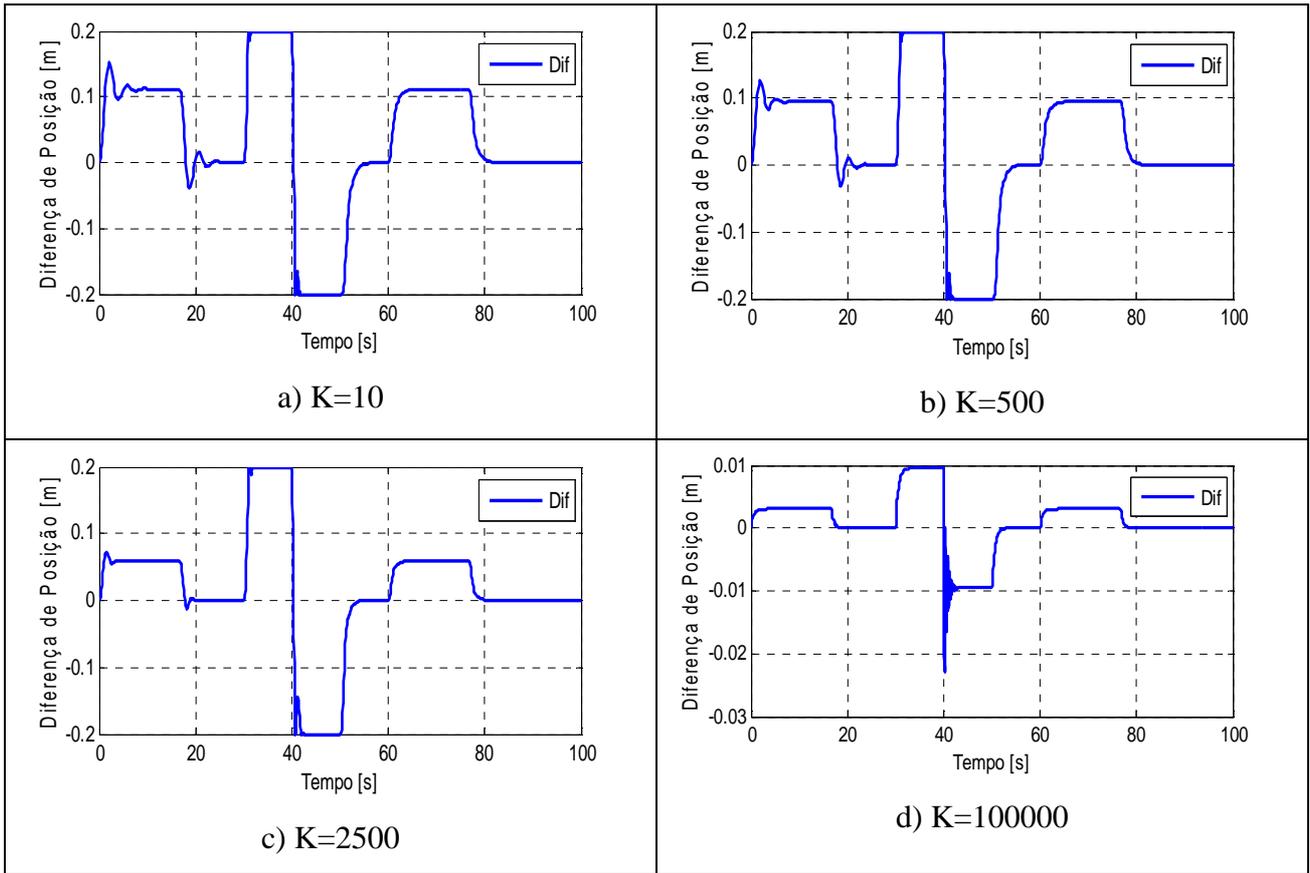


Figura. 4.64. Diferença de posição, Caso 3 c, REG = 10.

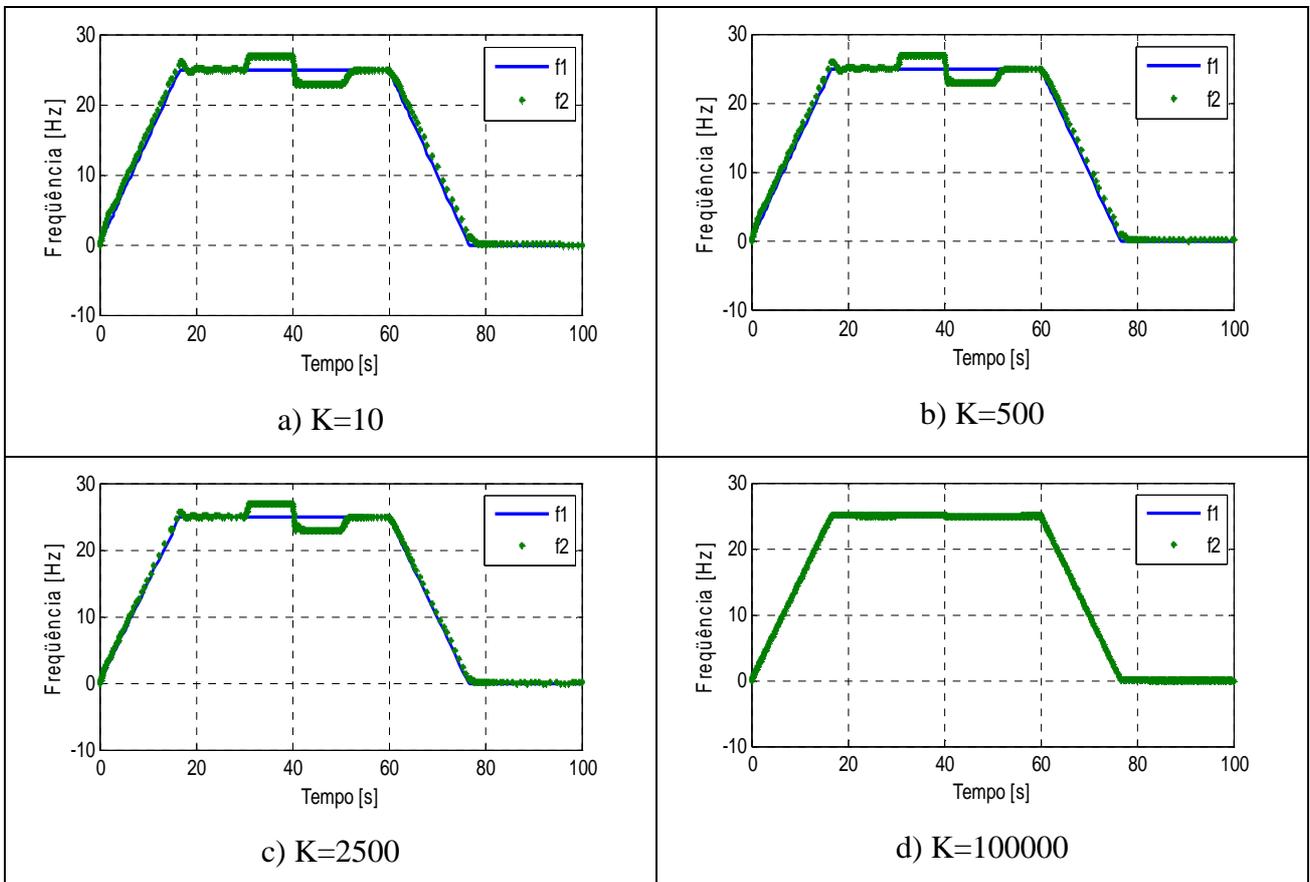


Figura. 4.65. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 c, REG = 10.

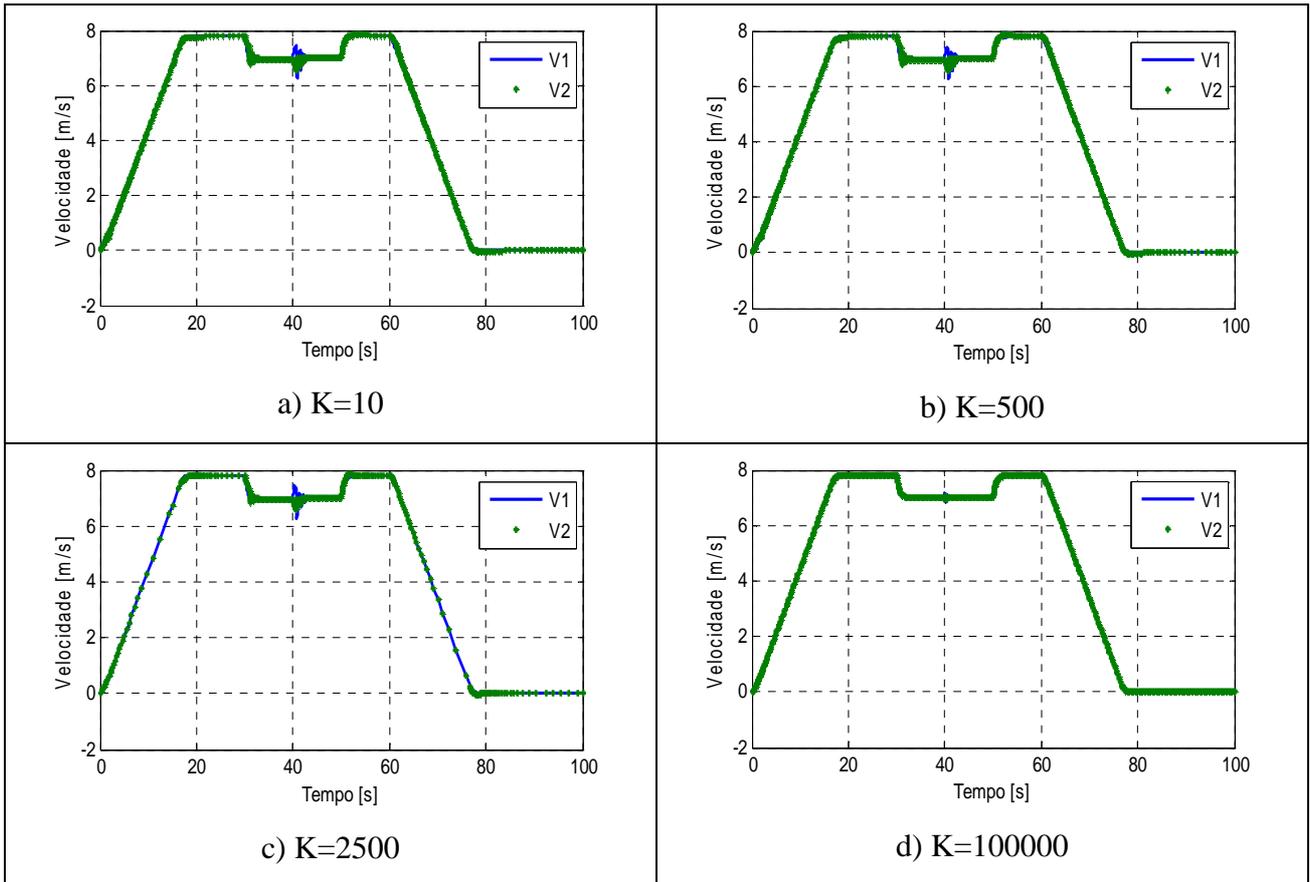


Figura. 4.66. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 d, REG = 1.

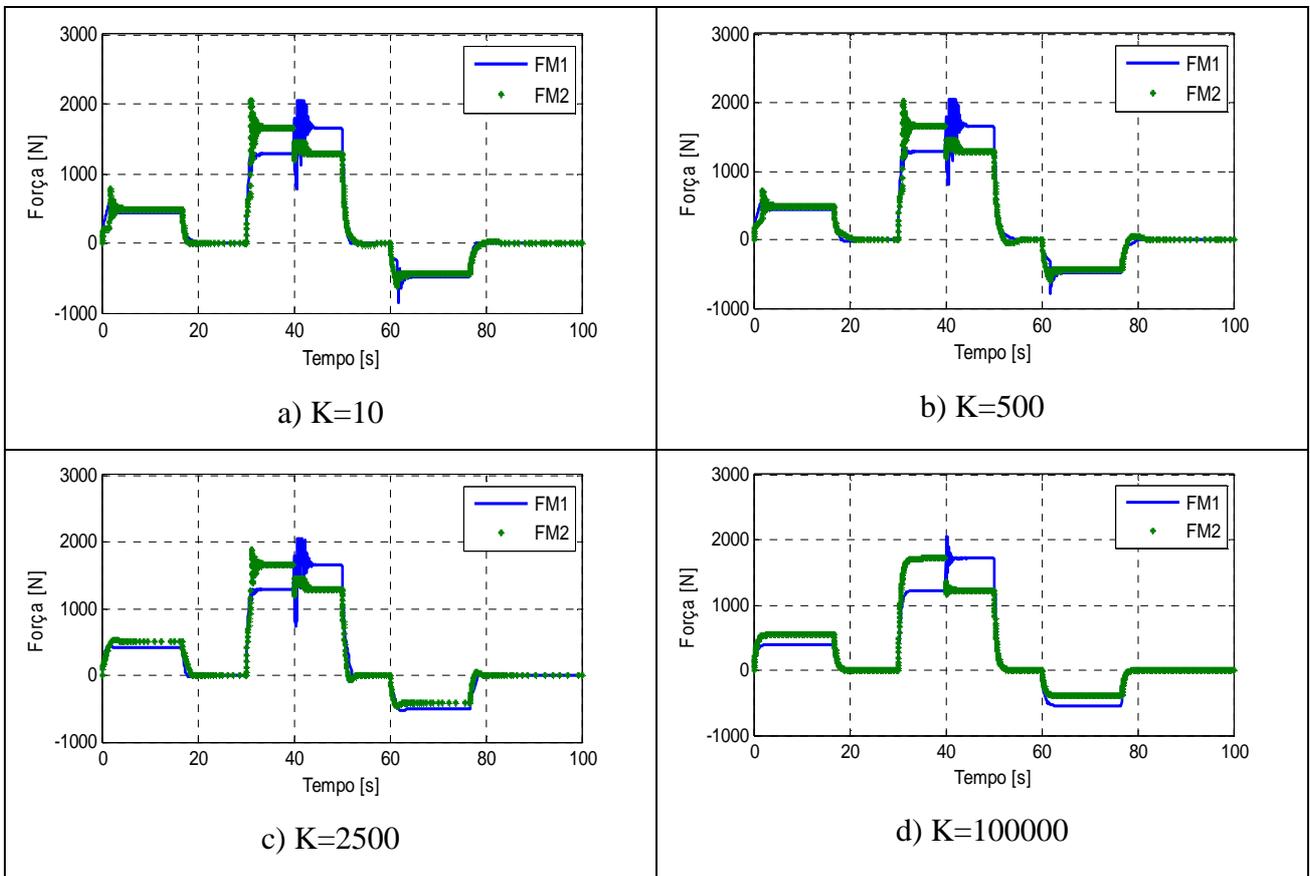


Figura. 4.67. Força 1 e Força 2, Caso 3 d, REG = 1.

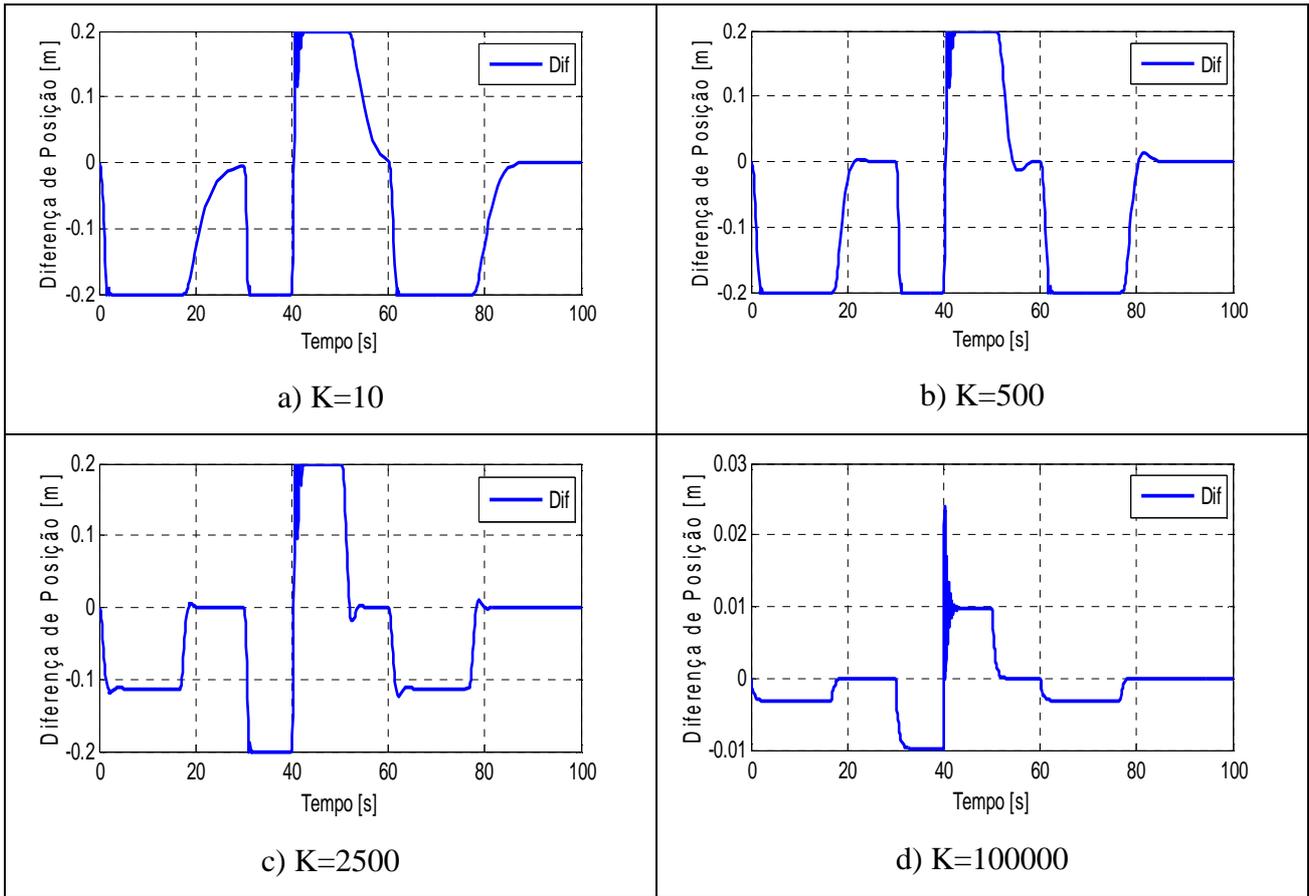


Figura. 4.68. Diferença de posição, Caso 3 d, REG = 1.

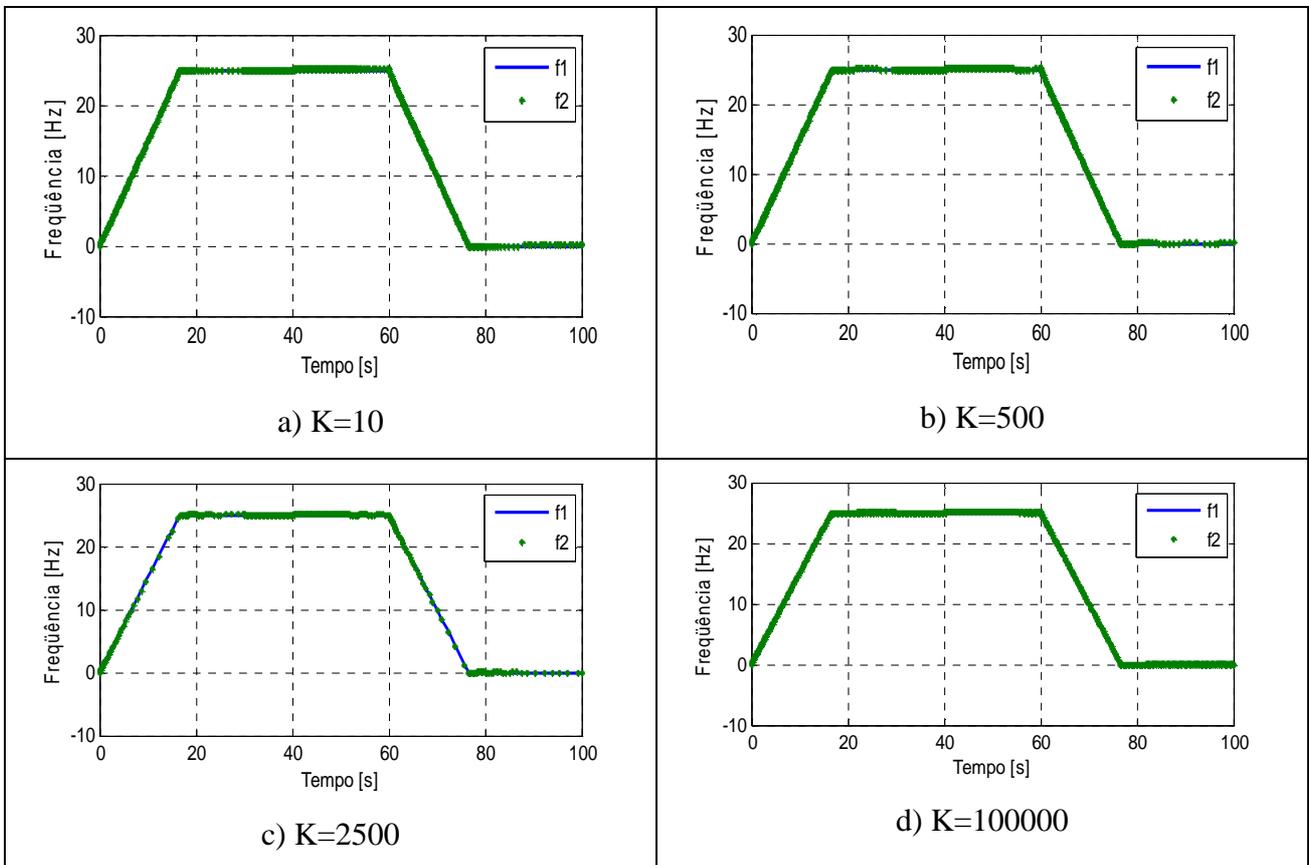


Figura. 4.69. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 d, REG = 1.

Para o caso 3(d), verifica-se que os limites máximos e mínimos são atingidos em  $K=10$ ,  $K=500$  e  $K=2500$ . Para compensar isto se sugere colocar um regulador proporcional com  $REG = 10$ . Verifica-se, a seguir, que mesmo assim, os limites são atingidos durante a rampa.

O caso 3(d) é igual ao 1(d) até o tempo 20s.

A variação de massa no tempo 40 segundos provoca uma oscilação na força, diferentemente do que aconteceu no caso 2.

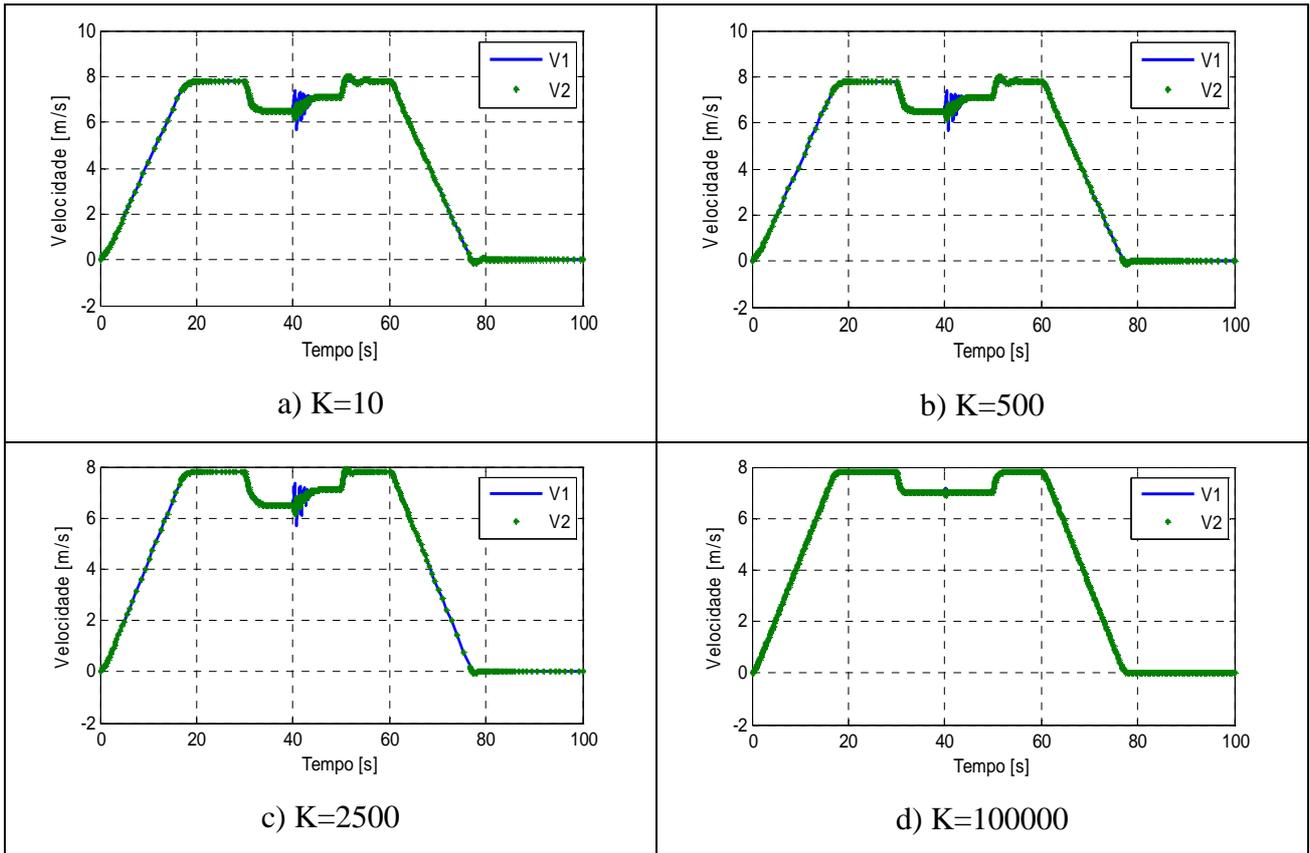


Figura. 4.70. Velocidade 1 e Velocidade 2, Caso 3 d, REG = 10.

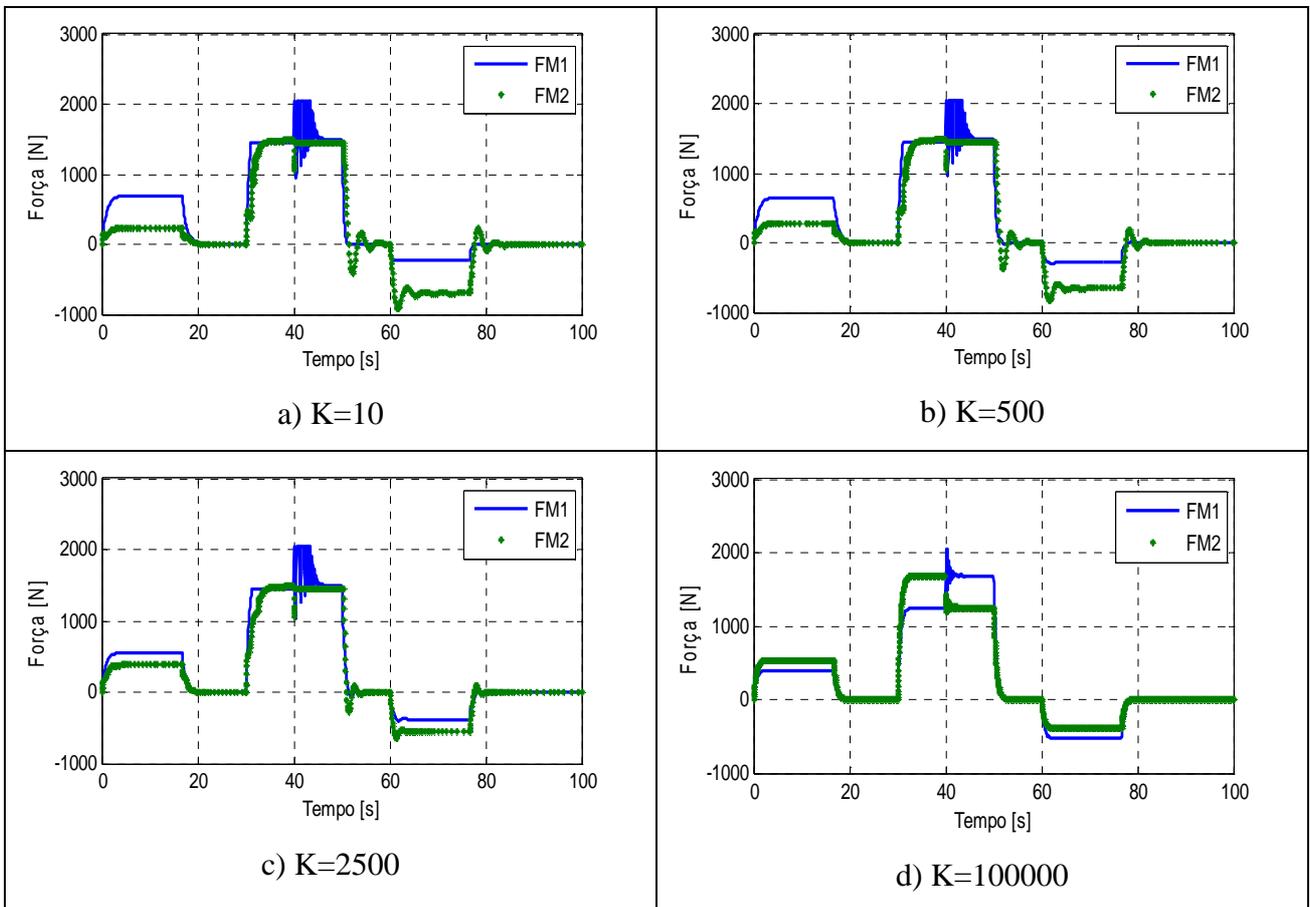


Figura. 4.71. Força 1 e Força 2, Caso 3 d, REG = 10.

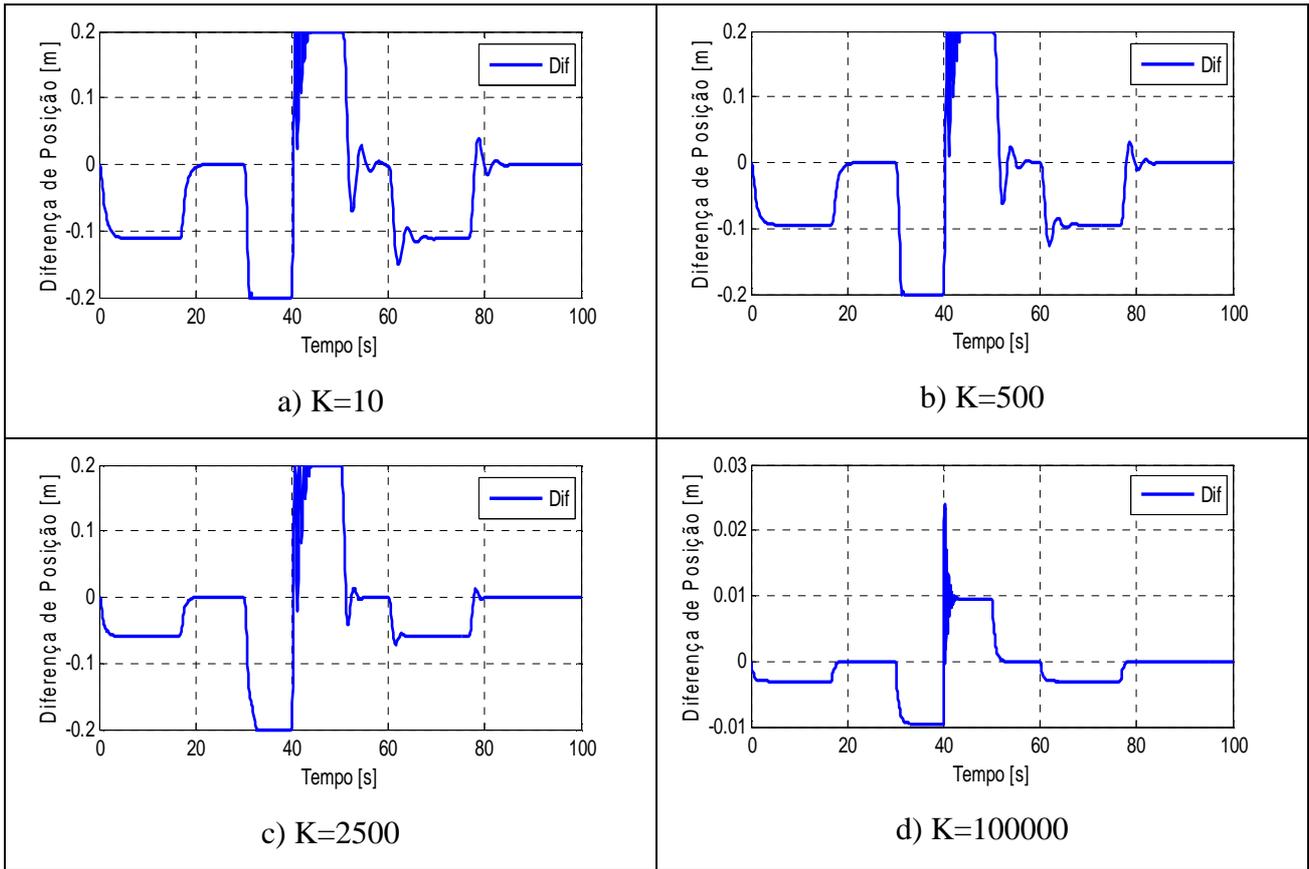


Figura. 4.72. Diferença de posição, Caso 3 d, REG = 10.

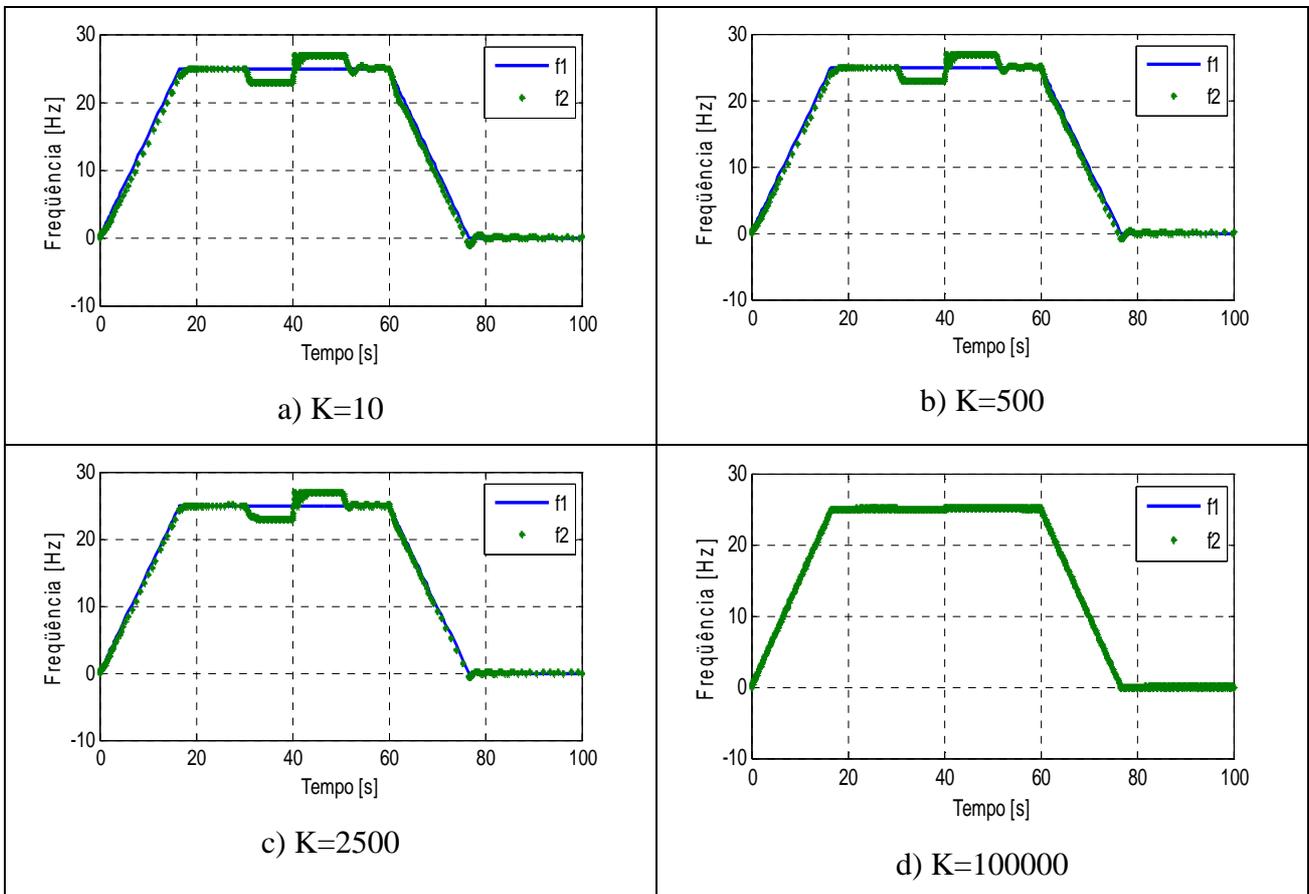


Figura. 4.73. Frequência 1 e Frequência 2, Caso 3 d, REG = 10.

#### **4.4 CONCLUSÕES.**

Quando o trem termina de passar sobre o plano inclinado consegue voltar à sua velocidade nominal.

O regulador proporcional garante o controle sobre os limites de esforço mecânico da borracha de interligação.

Quanto maior for a constante de elasticidade  $K$ , a diferença de posição diminuiu e o sistema suporta perturbações de maior grandeza.

## Capítulo 5

# Conclusão e Recomendações para Trabalhos Futuros

O objetivo principal da dissertação foi desenvolver o comando em malha aberta para a sincronização de dois módulos unitários do trem de levitação magnética MagLev-Cobra tracionado, cada um, por um motor linear. Foram abordados diferentes casos na operação do veículo.

As opções feitas para a simulação da sincronização com interligação entre os veículos, tanto rígida quanto flexível, mostraram que o sistema apresenta menores oscilações com a interligação rígida. A engenharia desenvolvida pelas empresas relacionadas com o desenho de borrachas flexíveis (Flexibus e Hubner) para a interligação entre módulos de transporte mostra que economicamente essa aplicação representa um investimento muito alto em comparação com a interligação rígida (ver Anexo A1). Atualmente, no mercado nacional, não existe a tecnologia necessária para desenvolver esse tipo de borracha.

O uso de uma borracha flexível para a interligação implica também no uso de um sensor de posição para medir a distância entre os módulos e o emprego de um processador para as operações do regulador.

Os testes realizados de rotor bloqueado comprovaram os dados para os diferentes entreferros do motor linear. A interface homem-máquina do inversor utilizado permitiu uma ampla observação do procedimento, facilitando as análises e conclusões.

A simulação para sincronização do sistema funcionou, permitindo a movimentação dos veículos ininterruptamente. Estas foram as contribuições relevantes deste trabalho.

Para a implementação do controle proposto pode usar-se a linguagem de programação LADDER ou uma interface entre o CLP do inversor CFW-11, e o software Simulink/Matlab.

A monitoração do peso, da velocidade e da posição dos módulos permitirá uma ampla flexibilidade de operação. A possibilidade de operação do MagLev-Cobra remotamente, através de uma central de controle, se tornaria então viável e o veículo poderia ser empregado como um APM (Automated People Mover).

Como recomendações para trabalhos futuros são propostos os seguintes itens:

- Testes experimentais da interligação mecânica de tipo rígido entre os módulos do veículo MagLev-Cobra.
- Elaboração de um controle em malha fechada para eliminação das variações de velocidade do motor linear utilizando controle vetorial.
- Para a monitoração da massa dos veículos, sugere-se uma plataforma suportada numa balança a qual, por sua vez, está suportada sobre os criostatos.
- Inclusão de outros sensores para o controle do veículo, como sensor de velocidade e posição, e sensores de temperatura e vácuo para os criostatos como primeiros passos para um APM.
- Solução para o problema com mais de dois módulos.

## 6. Referências Bibliográficas.

- [1] STEPHAN, R. M. , *Levitação Magnética (MagLev): Uma Quebra de Paradigma no Transporte de Massa do Século XXI*, CONINFRA, Agosto 2010, São Paulo, Brasil.
- [2] STEPHAN, R. M., EDUARDO G. D, *MagLev-Cobra: Urban transportation system using HTS-superconductors and permanent magnets*, MagLev, 2008, San Diego, USA.
- [3] DIAS, D. H. N., MOTTA, E. S., SOTELO, G. G., DE ANDRADE, R., STEPHAN, R. M., KUEHN, L., DE HAAS, O., SCHULTZ, L. , *Simulations and Tests of Superconducting Linear Bearings for a MAGLEV Prototype*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, v. 19, p. 2120-2123, 2009.
- [4] CHABU, I.E, GOMES, D.R, *Relatório Técnico / FAPERJ PI 56.146*, Equacional Elétrica e Mecânica Ltda, v. 1, p. 3-17, Dezembro 2009 São Paulo, Brasil.
- [5] FERREIRA, A. C, *Motores Elétricos Lineares*, ABINEE TEC, Outubro 2003, São Paulo, Brasil.
- [6] ELGERD O. I., *Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica*, McGraw-Hill do Brasil, Brasil, 1978.
- [7] *Manual de instalação e operação indicadores de pesagem 3101c,3102c,3103c,3104c,3107c*, Alfa Instrumentos Eletrônicos Ltda, v. 1.73 b0000, p. 1-35, 2010 São Paulo, Brasil.
- [8] Data Sheet *Célula de Carga Modelo ZX-500*, Alfa Instrumentos Eletrônicos Ltda, v. 1, p. 1-2, 2010 São Paulo, Brasil.
- [9] MACEDO, J. R, *Ensaio com o Rotor Bloqueado de um Motor de Indução Trifásico*, FEELT- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, p. 23-26, 2009.

- [10] *Manual de Programación CFW-11*, Weg, v. 1.3 X, p. 1-255, 2010, Brasil.
- [11] SIMULINK, *Dynamic System Simulation for MATLAB v.3*, p. 1-605, 1990, USA.
- [12] ROBERTO, K. C. A., *Ajuste de Partida de um Motor Linear a partir da Rampa de Aceleração*, Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril de 2006.
- [13] DE ANDRADE, R., SANTOS, G., ROSÁRIO, M. A. P., NEVES, M. A., PEREIRA, A. S., RIPPER, A., COSTA, G. C., NICOLSKY, STEPHAN, R. M., *Performance of Nd-Fe-B and Ferrite Magnets in Superconducting Linear Bearings with Bulk YBCO*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, EUA, v. 13, n. 2, p. 2271-2274, 2003.
- [14] STEPHAN, R. M., NICOLSKY, R., NEVES, M. A. ; FERREIRA, A. C., ANDRADE JR, R., MOREIRA, M. A. C., ROSÁRIO, M. A. P., MACHADO, O. J., *A Superconducting Levitation Vehicle Prototype*, Physica C, Superconductivity, v. 408, p. 932-934, 2004.
- [15] EDUARDO, G.D., STEPHAN, R. M, MANFREDI, D.N, DRUMMOND, A., *Maglev cobra proposta de aplicação de veículos de levitação magnética supercondutora no transporte público do rio de janeiro*, Rio de Transportes, p.1-14, Junho, 2006, Rio de Janeiro, Brasil.

## 7. Anexos

### A-1 E-MAILS

Empresa Flexibus - Sanfonados LTDA.

☆ Tales Cembraneli Dantas para usuario [mostrar detalles](#) 25 oct Responder

Andrei, Bom Dia

Me desculpa a demora, mas estamos em obras aqui em nossa fábrica e esta tudo muito tumultuado. Sobre a sanfona do seu trem, serei muito justo com você. Estudamos seu projeto e não temos hoje toda tecnologia necessária para poder estar desenvolvendo este acoplamento entre vagões, para desenvolvermos esta tecnologia para um protótipo de trem não compensa, pois o custo é muito alto e não teríamos mercado para absorver e amortizar este investimento. Hoje a Flexibus é especializada em sanfonas para ônibus articulados e trens comuns de passageiros, onde a tecnologia é totalmente diferente. Creio que será necessário importar este primeiro lote, ou desenvolver com uma empresa nacional de maior porte, que esteja interessada em fazer tal investimento. Muito obrigado pela cotação e espero fazermos negócios no futuro.

Att.

**Tales Cembraneli Dantas | Eng. do Produto**  
+55 12 9711-3793 | [tales@flexibus.com.br](mailto:tales@flexibus.com.br)  
+55 12 3653-2230 | [www.flexibus.com.br](http://www.flexibus.com.br)

☆ Tales Cembraneli Dantas para usuario [mostrar detalles](#) 1 sep Responder

Andrei, Boa Tarde

Quando você nos procurou, nos pediu para que fizéssemos um orçamento para a interligações dos módulos do trem Maglev Cobra, ficamos muito empolgados com a possibilidade de desenvolvermos tal tecnologia, porem nossa visita a LASUP-UFRJ nos mostrou a dimensão realmente do que se deseja com relação a interligação dos módulos, e creio que apenas com uma "borracha" ou "goma", não daria a segurança necessária na conexão entre os módulos. Nossa sugestão seria dentro desta "borracha" ou "goma", utilizarmos de meios mecânicos como cabos ou amortecedores, para darmos maior segurança e confiabilidade para a conexão entre módulos. Estamos desenvolvendo um pré-projeto e creio que dentro de uns 7 a 10 dias já terei algo mais concreto como um desenho para lhe apresentar.

Desculpe a demora na resposta do e-mail.

Att.

**Tales Cembraneli Dantas | Eng. do Produto**  
+55 12 9711-3793 | [tales@flexibus.com.br](mailto:tales@flexibus.com.br)  
+55 12 3653-2230 | [www.flexibus.com.br](http://www.flexibus.com.br)

## Empresa HUBNER Sanfonas Industrias Ltda.

☆ Rodolfo-Hubner para usuario

[mostrar detalhes](#) 16:54 (11 minutos antes)

Responder

Andrei,

Vc saberia nos dizer quais são as forças que estariam atuando entre carros durante o início do movimento e durante o deslocamento ? Por se movimentar isoladamente estas forças seriam zero?

A utilização de acoplamentos rígidos torna a sincronização do movimento dos carros mais precisa tanto no início do movimento quanto durante o movimento, conforme discutimos e você percebeu no seu teste. Dependendo do estudo de movimento o tipo de acoplamento também muda.

Se você imaginar um movimento em curva, um lado da conexão entre carros tende a fechar e outro lado a abrir, no lado que há o fechamento, a borracha é comprimida e do outro é estendida. Vai existir uma força da borracha dificultando este movimento muito maior se vc comparar com um sistema de dobra com tecidos.

Outro problema que eu percebi olhando o seu projeto está na fixação da borracha e no acoplamento e desacoplamento dos carros, seja por manutenção ou ampliação dos números de carros.

O pessoal está achando que a distância de 100 mm é muito pequena

Obrigado

Rodolfo Yaokiti  
Hubner Sanfonas Industriais - Brasil  
(+55 12 3653-3622  
T: +55 12 3653-4704  
\*: [rodolfo@hubner-brasil.com.br](mailto:rodolfo@hubner-brasil.com.br)

## A-2 DATA SHEET CÉLULA DE CARGA

### ⊕ ZX - (Tração / Compressão)

#### ⊕ Informações Gerais:

A célula de carga Mod. ZX possui tamanho compacto, construção muito robusta, é cuidadosamente balanceada e mantém boa rejeição de cargas excêntricas ou laterais mesmo em condições adversas de operação.



#### ⊕ Principais Aplicações:

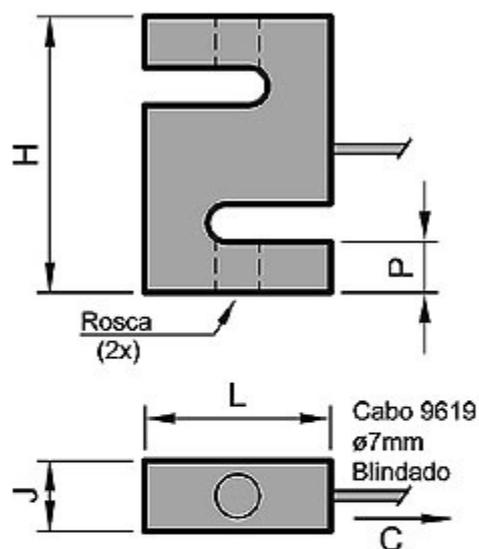
- Conversão de Balanças Rodoviárias mecânicas em eletrônicas
- Balanças Híbridas (Eletro-Mecânicas)
- Esforços de tração
- Balanças suspensas

#### ⊕ Especificações:

Capacidade Nominal - kg	250, 500, 1.000, 2.000, 5.000
Material	Aço inox
Sensibilidade mv/v	2 +/- 0,1%
Erro combinado - % saída nominal	< 0,03
Creep à capacidade nominal - % saída nominal	20 min: < 0,03 08hs: < 0,05
Zero inicial - % saída nominal	+/- 1
Temperatura de trabalho útil °C	- 5 a + 60
Temperatura de trabalho compensada - °C	0 a + 50
Erro excentricidade conforme OIML	> 5000 divisões
Efeito da temperatura - ppm/°C da saída nominal	no zero: < 30 na calibração: < 10
Máx. sobrecarga s/ alterações - % cap. nominal	150
Sobrecarga de ruptura - % cap. nominal	300
Excitação VCC ou VCA	máxima: 15 recomendada: 10
Resistência elétrica entrada - ohms	400 + / - 10
Resistência elétrica saída - ohms	350 + / - 1
Resistência de isolamento (50 VCC máx) - megaohms	> 5000

Deflexão máxima - mm a capacidade nominal	< 0,3
Grau de proteção (IEC 529)	IP67

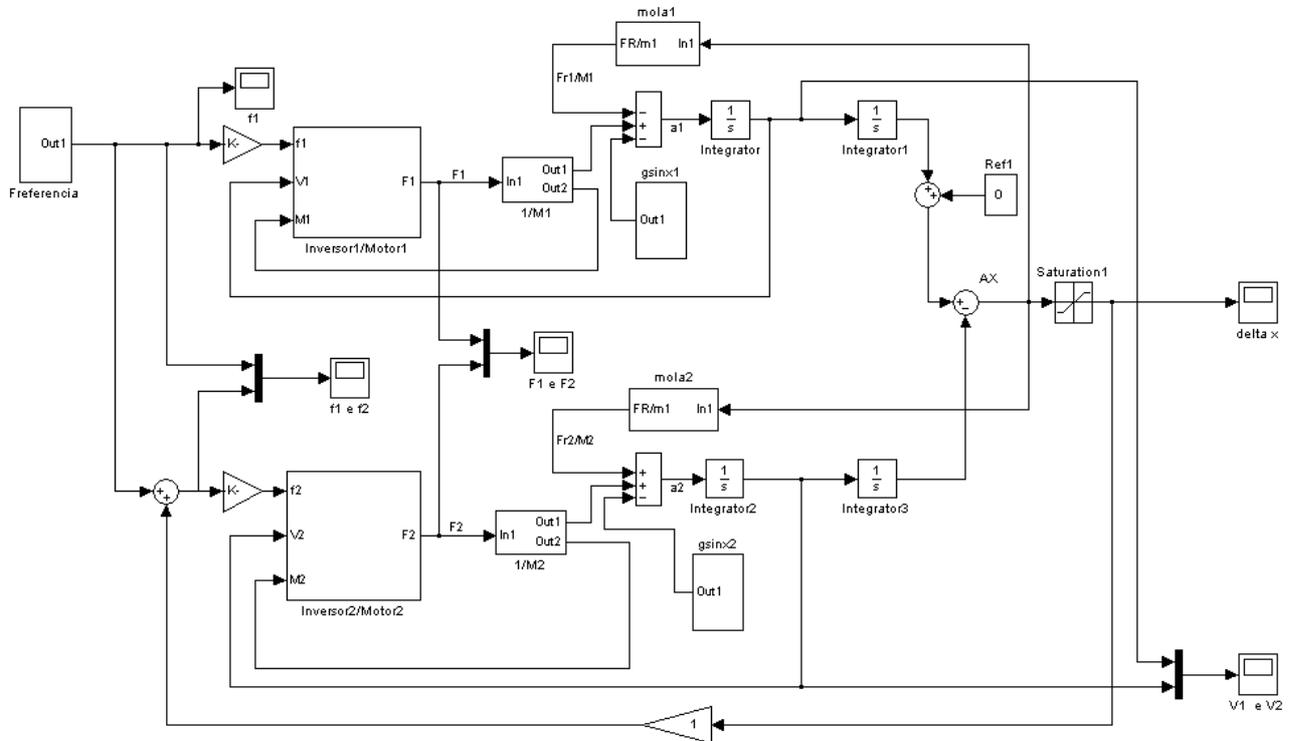
→ Dimensões



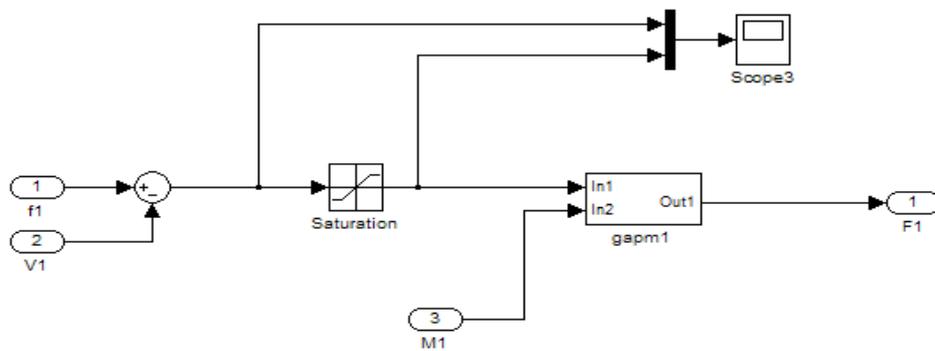
<b>NOTA (1):</b>	ZX-250/500/1T/2T/5T cabo 9619 (Æ 7mm blindado)					
<b>NOTA (2):</b>	Medidas em mm					
<b>Modelo</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>J</b>	<b>L</b>	<b>P</b>	<b>Rosca</b>
Z-250/500	3.0m	78	25	60	12	M12x1.75
Z-1T	3.0m	86	30	60	16	M16x2
Z-2T	3.0m	90	30	70	17	M16x2
Z-5T	5.0m	136	50	100	25	M24x2

## A-3 IMPLEMENTAÇÃO NO SOFTWARE SIMULINK/MATLAB.

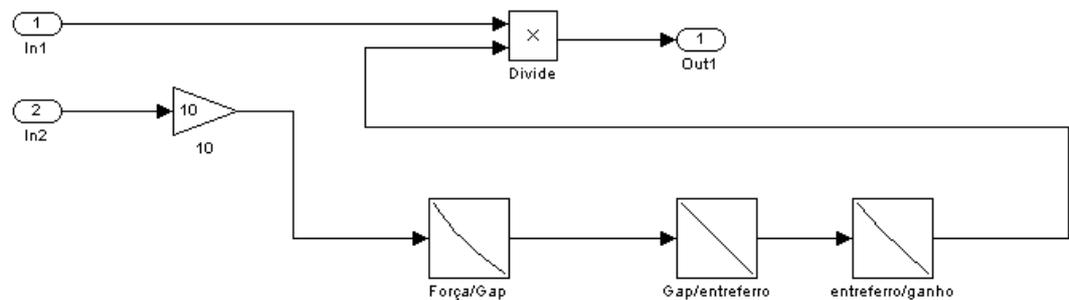
### Diagrama de controle



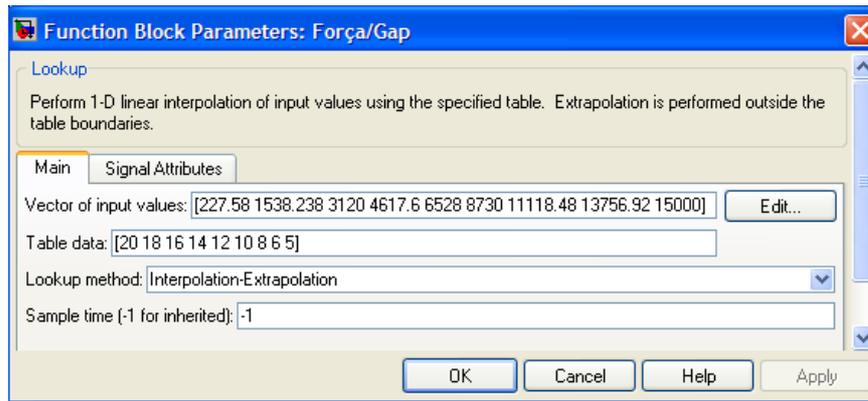
### Bloco Inversor/Motor



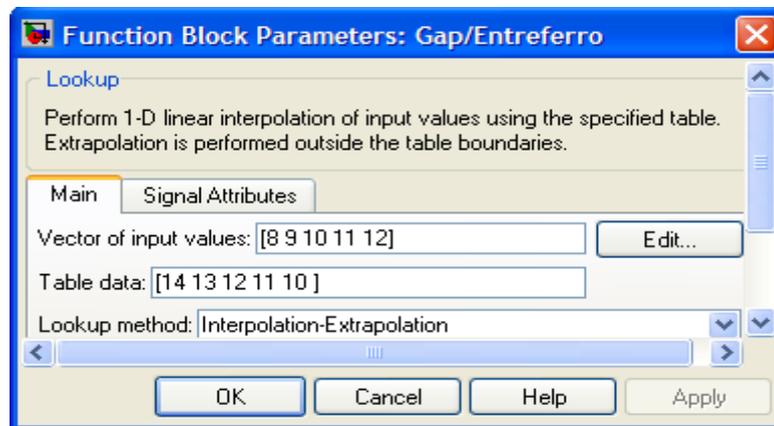
### Bloco gapm



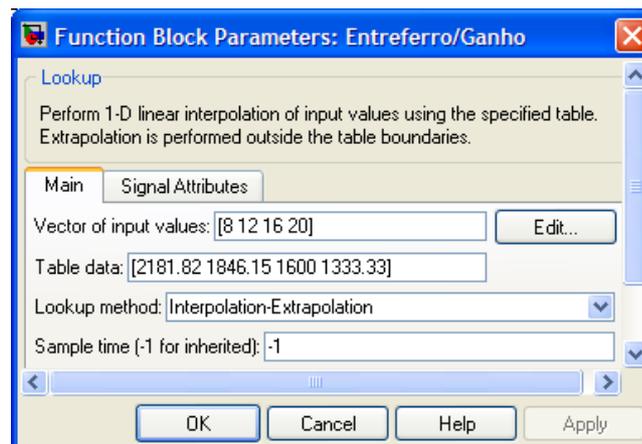
## Força/Gap



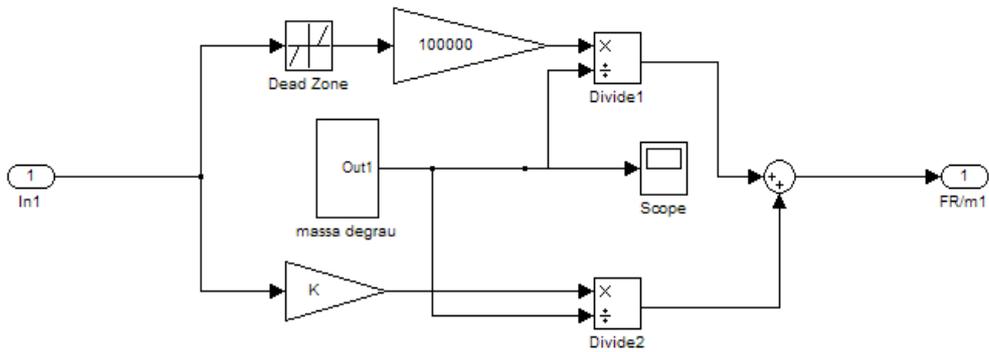
## Gap /Entreferro



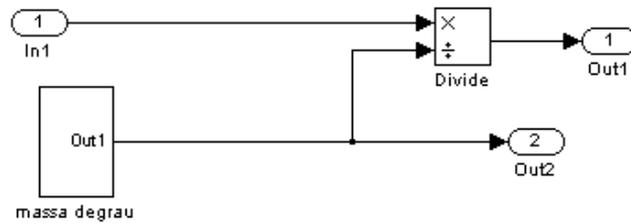
## Entreferro/Ganho



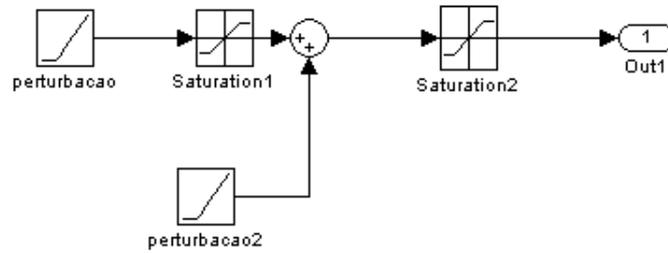
### Bloco mola



### Bloco 1/M



### Bloco gsinx



### Bloco Preferencia

