

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE LATERAL EM CONJUNTOS DE VEÍCULOS DE CARGA

RUBEM PENTEADO DE MELO

2004

RUBEM PENTEADO DE MELO

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE LATERAL DE CONJUNTOS DE
VEÍCULOS DE CARGA**

Dissertação apresentada como requisito de avaliação no
curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da PUC-PR

Orientador: Prof. Dr. Nilson Barbieri

Co-Orientador: Prof. Dr. Renato Barbieri

CURITIBA

2004

TERMO DE APROVAÇÃO

RUBEM PENTEADO DE MELO

“AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE LATERAL EM CONJUNTOS DE VEÍCULOS DE CARGA”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Presidente: Prof. Dr. Nilson Barbieri (Orientador)
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)

Prof. Dr. Renato Barbieri (Co-orientador)
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)

Prof. Dr. Lauro César Nicolazzi
Departamento de Engenharia Mecânica – CTC - (UFSC)

Prof. Dr. Roberto Dalledone Machado
Curso de Engenharia Mecânica (PUCPR)

Curitiba, 30 de julho de 2004

A minha Esposa Daisy e meus filhos Rodrigo e Carolina,
pelo amor, amizade e apoio;

Ao meu Pai e minha Mãe;
pelo exemplo de vida;

OFEREÇO

Ao meu Pai, Prof. Rubem de Melo;

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos ao meu orientador, Prof. Nilson Barbieri, sem o qual não seria possível para mim concluir esse trabalho. Agradeço também a todos os Professores do Mestrado da PUC-PR pelos estudos e reflexões desenvolvidos e a todos os que colaboraram na busca pela literatura existente sobre o assunto.

Às instituições, tenho a agradecer, inicialmente, a empresa Transtech Engenharia e Inspeção S/C (www.transtech.com.br) e ao OSCIP Instituto de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento Sustentável em Transportes - IDT, pelo apoio e suporte ao trabalho desenvolvido. Também aos representantes dos fabricantes Bernard Krone do Brasil, Pierino Gotti – Industria de Implementos Rodoviários, Metalúrgica Pastre e Noma do Brasil pelas informações e materiais necessários ao desenvolvimento do estudo e das transportadoras Vantropa e Tic Transportes pelo empréstimo dos veículos avaliados.

Finalmente, a PUC-PR pela oportunidade e infra-estrutura disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Transporte Rodoviário de Cargas.....	1
1.2 Veículos para o Transporte de Cargas.....	2
1.3 Critérios Técnicos para Construção de Rodovias e sua relação com os tipos de veículos.....	3
1.4 Carteira de habilitação dos motoristas e sua relação com os tipos de veículos.....	4
1.5 A Evolução dos veículos para o Transporte de Cargas	5
1.6 Características específicas de Conjuntos de Veículos de Carga	9
1.7 Critérios para Avaliação da Estabilidade Lateral de Veículos	11
1.8 Acidentes Típicos.....	12
1.9 Objetivos.....	15
2. MODELAMENTO MATEMÁTICO DOS CVCs.....	17
2.1 Referencial Teórico.....	17
2.2 Modelamento matemático	19
2.2.1 Análise Cinemática:	19
2.2.2 Modelamento do Bi-trem	21
2.2.3 Equações do Movimento para o Bi-trem.....	23
2.2.3.1 Para o veículo-trator	23
2.2.3.2 Para o primeiro semi-reboque	23
2.2.3.3 Para o segundo semi-reboque.....	24
2.2.3.4 Equações gerais do conjunto de veículos.....	28
2.2.3.5 Simulação Dinâmica	33
2.2.4 Modelamento do Rodotrem.....	35
2.2.5 Equações do Movimento.....	37
2.2.5.1 Para o veículo-trator	37
2.2.5.2 Para o primeiro semi-reboque	37

2.2.5.3 Para o dolly intermediário	38
2.2.5.4 Para o segundo semi-reboque	38
2.2.5.5 Simulação Dinâmica	50
2.3 Validação do Modelo Matemático	52
3. AVALIAÇÃO DOS CVCs	55
3.1 Equipamentos para avaliação dos Conjuntos de Veículos	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 Resultado da Análise Matemática	62
4.1.1 Comparativo na condição carregado, a 70 km/h	62
4.1.2 Comparativo na condição vazio, a 70 km/h	63
4.1.3 Comparativo na condição 1º semi-reboque vazio e 2º. carregado, a 70 km/h	65
4.1.4 Avaliação do conjunto Rodotrem alterando-se o comprimento do Dolly Intermediário.	66
4.1.5 Comparativo na condição carregado, a 70 km/h, entrada senoidal	68
4.1.6 Comparativo na condição vazio, a 70 km/h, entrada senoidal	69
4.1.7 Comparativo na condição 1º semi-reboque vazio e 2º. carregado, a 70 km/h, senoidal	71
4.1.8 Comparativo entre Bi-trem e Rodotrem em velocidades de 20 km/h a 90 km/h.....	72
4.1.9 A questão da instabilidade do conjunto Rodotrem.....	74
4.2 Avaliação de um CVC com o equipamento SkySafe Cargo	75
4.2.1 Resultados obtidos.	78
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	80
5.1 Conclusões.....	80
5.2 Recomendações.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
GLOSSÁRIO	86
ANEXO 1	87
ANEXO 2	105
ANEXO 3	109

LISTA DE SÍMBOLOS

a	- Vetor Aceleração
a	- Distância do primeiro eixo do primeiro veículo até seu centro de gravidade
α_j	- Ângulo de deriva (<i>slip angle</i>)
b_1	- Distância do segundo eixo do primeiro veículo até seu centro de gravidade
b_2	- Distância do terceiro eixo do primeiro veículo até seu centro de gravidade
c_1	- Distância do centro do engate do segundo veículo até seu centro de gravidade
c_2	- Distância do centro do engate do terceiro veículo até seu centro de gravidade
c_3	- Distância do centro do engate do quarto veículo até seu centro de gravidade
δ	- Ângulo de esterçamento do pneu (<i>steer angle</i>)
ϕ	- Ângulo genérico
F_i	- Força lateral no eixo i
g	- Aceleração da Gravidade
h	- Distância do acoplamento (5ª-roda) do primeiro veículo até seu centro de gravidade
h_2	- Distância do acoplamento (engate) do dolly até o centro de sua 5ª-roda
I_0	- Momento de Inércia do primeiro veículo (veículo-trator)
I_1	- Momento de Inércia do segundo veículo
I_2	- Momento de Inércia do terceiro veículo
I_3	- Momento de Inércia do quarto veículo
L_{11}	- Distância do primeiro eixo do segundo veículo até sua articulação
L_{12}	- Distância do segundo eixo do segundo veículo até sua articulação

L_{21}	- Distância do primeiro eixo do terceiro veículo até sua articulação
L_{22}	- Distância do segundo eixo do terceiro veículo até sua articulação
L_{31}	- Distância do primeiro eixo do quarto veículo até sua articulação
L_{32}	- Distância do segundo eixo do quarto veículo até sua articulação
m_1	- Massa do primeiro veículo (veículo-trator)
m_2	- Massa do segundo veículo
m_3	- Massa do terceiro veículo
m_4	- Massa do quarto veículo
N_i	- Força Vertical no eixo i
s_1	- Distância do centro do engate do segundo veículo até o centro do acoplamento com o terceiro veículo
s_2	- Distância do centro do engate do terceiro veículo até o centro do acoplamento com o quarto veículo
S_i	- Força transversal no acoplamento i
T_i	- Força longitudinal no acoplamento i
u	- Velocidade na direção do vetor i
$\dot{u}$	- Derivada primeira da velocidade na direção do vetor i em relação ao tempo
V	- Vetor velocidade
v	- Velocidade na direção do vetor j
$\dot{v}$	- Derivada primeira da velocidade na direção do vetor j em relação ao tempo
ω	- Velocidade Angular do conjunto
$\dot{\omega}$	- Derivada primeira da velocidade angular em relação ao tempo
ϕ_1	- Ângulo de Inclinação entre o primeiro e o segundo veículo

- $\dot{\phi}_1$ - Derivada primeira em relação ao tempo do Ângulo de Inclinação entre o primeiro e o segundo veículo
- $\ddot{\phi}_1$ - Derivada segunda em relação ao tempo do Ângulo de Inclinação entre o primeiro e o segundo veículo
- ϕ_2 - Ângulo de Inclinação entre o segundo e o terceiro veículo
- $\dot{\phi}_2$ - Derivada primeira em relação ao tempo do Ângulo de Inclinação entre o segundo e o terceiro veículo
- $\ddot{\phi}_2$ - Derivada segunda em relação ao tempo do Ângulo de Inclinação entre o segundo e o terceiro veículo
- ϕ_3 - Ângulo de Inclinação entre o terceiro e o quarto veículo
- $\dot{\phi}_3$ - Derivada primeira em relação ao tempo do Ângulo de Inclinação entre o terceiro e o quarto veículo
- $\ddot{\phi}_3$ - Derivada segunda em relação ao tempo do Ângulo de Inclinação entre o terceiro e o quarto veículo

LISTA DE FIGURAS

TABELA 1 - Evolução da Distribuição do Modal no Brasil (1950 a 1995 %)	2
FIGURA 1 - Conjunto de Veículos de Carga do tipo Bi-trem	7
FIGURA 2 - Conjunto de Veículos de Carga do tipo Rodotrem	8
FIGURA 3 - Acidente com Conjunto do tipo Bi-trem na Rodovia BR-376	13
FIGURA 4 - Acidente com Conjunto do tipo Bi-trem na Serra das Araras	14
FIGURA 5 - Sistema de Referência	20
FIGURA 6 - Ilustração do Modelo Bi-trem	21
FIGURA 7 - Modelo Bi-trem – Dimensões principais	22
FIGURA 8 - Veículo-trator	23
FIGURA 9 - Primeiro semi-reboque	23
FIGURA 10 - Segundo semi-reboque	24
FIGURA 11 - Ângulo de esterçamento e ângulo de deriva	27
FIGURA 12 - Ilustração do esterçamento em forma de degrau	34
FIGURA 13 - Ilustração do esterçamento em forma senoidal	34
FIGURA 14 - Ilustração do modelo Rodotrem	35
FIGURA 15 - Modelo Rodotrem – Dimensões principais	36
FIGURA 16 - Veículo trator – Rodotrem	37
FIGURA 17 - Primeiro semi-reboque – Rodotrem	37
FIGURA 18 - Dolly intermediário	38
FIGURA 19 - Segundo semi-reboque – Rodotrem	39
FIGURA 20 - Resposta lateral para esterçamento de entrada - F. Jindra	52
FIGURA 21 - Velocidade lateral do trator	53

FIGURA 22 - Ângulo de inclinação do semi-reboque.....	53
FIGURA 23 - Ângulo de inclinação do reboque dolly.....	54
FIGURA 24 - Ângulo de inclinação do reboque.....	54
FIGURA 25 - Diagrama do Sistema SkySafe Cargo.....	57
FIGURA 26 - Sistema SkySafe Cargo Simplificado.....	58
FIGURA 27 - Foto do Módulo do Acelerômetro.....	60
FIGURA 28 - Ilustração da tela do Software SkySafe Cargo.....	61
FIGURA 29 - Aceleração Lateral – Conjunto Bi-trem - Carregado.....	62
FIGURA 30 - Aceleração Lateral – Conjunto Rodotrem - Carregado.....	63
FIGURA 31 - Aceleração Lateral – Conjunto Bi-trem – Vazio	64
FIGURA 32 - Aceleração Lateral – Conjunto Rodotrem – Vazio	64
FIGURA 33 - Conjunto Bi-trem na condição 1º semi-reboque vazio e 2º Carregado.....	65
FIGURA 34 - Conjunto Rodotrem na condição 1º semi-reboque vazio e 2º Carregado.....	66
FIGURA 35 - Conjunto Rodotrem carregado reduzindo-se o comprimento do Dolly intermediário.....	67
FIGURA 36 - Aceleração Lateral – Conjunto Bi-trem carregado. Senoidal.....	68
FIGURA 37 - Aceleração Lateral – Conjunto Rodotrem carregado. Senoidal.....	68
FIGURA 38 - Aceleração Lateral conjunto Bi-trem vazio. Senoidal.....	69
FIGURA 39 - Aceleração Lateral conjunto Rodotrem vazio. Senoidal.....	70
FIGURA 40 - Aceleração Lateral conjunto Bi-trem, 1º semi-reboque vazio e 2º carregado. Entrada Senoidal.....	71
FIGURA 41 - Aceleração Lateral conjunto Rodotrem, 1º semi-reboque vazio e 2º carregado. Entrada Senoidal	71
FIGURA 42 - Comparativo Bi-trem – Entrada em Degrau. Velocidades.....	72

FIGURA 43 - Comparativo Bi-trem – Entrada em Senoidal. Velocidades.....	73
FIGURA 44 - Comparativo Rodotrem – Entrada em Degrau. Velocidades.....	73
FIGURA 45 - Comparativo Rodotrem – Entrada Senoidal. Velocidades.....	74
TABELA 2 - Autovalores do Sistema para o Rodotrem.....	75
FIGURA 46 - Conjunto do tipo Bi-trem ensaiado em 24 de abril de 2004.....	76
FIGURA 47 - Detalhe do Acelerômetro 1 no veículo-trator.....	76
FIGURA 48 - Detalhe do Acelerômetro 2 no 2º semi-reboque.....	77
FIGURA 49 - Detalhe do Notebook na cabine, para armazenagem dos dados.....	77
FIGURA 50 - Gráfico de Acelerações laterais – Rota 1.....	78
FIGURA 51 - Gráfico de Acelerações laterais – Rota 2.....	79
FIGURA 52 - Gráfico de Acelerações laterais – Rota 3.....	79

RESUMO

Em 1998 a Resolução 68/98 do CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito, autorizou a circulação de Combinações de Veículos de Cargas - CVCs. Devido a sua maior capacidade de carga comparado com conjuntos convencionais de Caminhão-trator+semi-reboque, o volume de CVCs em circulação cresceu rapidamente, principalmente os chamados Bi-trens e Rodotrens. Comprovadamente representantes de uma evolução dos veículos de carga pelo ganho de produtividade que proporcionam aos transportadores e pelos benefícios diretos e indiretos à nação através da redução dos custos com o transporte de seus produtos, esses conjuntos precisam ser observados sob a ótica de suas características de dirigibilidade e segurança e os impactos que o aumento do volume de CVCs em circulação pode causar nas estatísticas de acidentes. Devido a quantidade de articulações esses conjuntos estão sujeitos a fenômenos específicos que afetam significativamente sua dirigibilidade. Dentre eles o mais relevante é a "Amplificação Traseira". Trata-se do aumento do deslocamento lateral da última unidade quando comparado com o deslocamento lateral da unidade tratora durante curvas e manobras evasivas. Em consequência dessa amplificação a unidade traseira é submetida a acelerações laterais maiores, podendo vir a tombar e levar consigo todo o conjunto. Um estudo para determinação da razão da Amplificação Traseira dos principais tipos de CVCs é pré-requisito para a necessária evolução/correção dos projetos de veículos de carga, rodovias, sinalização viária e na formação de condutores. Este foi o objetivo deste trabalho.

ABSTRACT

In 1998 the Resolution 68/98 of CONTRAN – National Council of Traffic, authorized the transit of Cargo Vehicles Combinations - CVCs. Because their major capacity of freight compare with conventional combinations truck-tractor + semi-trailer, the numbers of CVCs in roads grow up rapidly, mainly the types Bi-trains and Rodotrains. Certainly representative of a cargo vehicles evolution because the increase of productivity that provide to the freight firms and by the direct and indirect goods to the country through the decrease of the product transportation's costs, these vehicles combinations must be observer about their characteristics of handling and security and the impacts that de increase of CVCs in the roads can have in the statistic of crash. Because the number of articulations, these combinations have specifics phenomenon that affect their handling. Among them the must important is the "Rearward Amplification". It is the increase of lateral displacement of the last vehicle when compared with the lateral displacement of the tractor vehicle in curves and evasive maneuvers. In consequent of this rear amplification, the last unit is exposed to highest lateral acceleration, and can rollover, taking with it the another vehicles of combination. A study for the determination of the rate of this amplification for the mainly types of CVCs is necessary to the evolution/correction of vehicles design, roads design, traffic signs and drivers courses. This was the objective of this work.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Transporte Rodoviário de Cargas

O principal meio de transporte de cargas no Brasil é o rodoviário. Por uma malha rodoviária de aproximadamente 1,6 milhões de quilômetros e por 1,576 milhões de veículos circulam cerca de 63% de toda produção nacional. Segundos dados do SETCERGS – Sindicato das Empresas Transportadoras de Cargas do Rio Grande do Sul, o segmento é responsável por 3,4 % do Produto Interno Bruto e um faturamento anual de US\$ 23,8 bilhões de dólares [1].

A participação do transporte rodoviário de cargas não é maior somente no Brasil. Na Europa e nos Estados Unidos o modal rodoviário também supera os demais [2].

Dados divulgados pela IRU - International Road Transport Union e do GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes, apontam para uma tendência de crescimento e predomínio do transporte rodoviário de cargas sobre os demais modais não constitui, como se costuma afirmar freqüentemente, uma peculiaridade brasileira ou o resultado de uma “política rodoviarista”. Na Europa, embora as políticas de investimentos e as regulamentações do transporte de cargas buscarem sempre favorecer as ferrovias, as tendências são idênticas às constatadas no Brasil.

De acordo com estudos patrocinados pela ATA Foundation, nos Estados Unidos, dos US\$ 420, 2 bilhões de fretes de carga primária (a carga de transferência, não incluindo

a distribuição final) gerados em 1996, cerca de 82,3% foram produzidos pelo setor rodoviário, apenas 7% foram realizados pela ferrovia.

No Brasil, analisando-se a distribuição intermodal entre 1980 a 1996, constata-se avanço do rodoviário (de 58,70% para 62,72%) em detrimento da ferrovia (queda de 24,5% para 20,72%) e da hidrovia (13,1% para 11,46%). O transporte aéreo mantém sua participação de cerca de 0,30%, enquanto a dutovia avança ligeiramente de 3,40% para 3,79%, conforme pode ser observado na Tabela 1 [2].

TABELA 1 - Evolução da Distribuição por Modal no Brasil (1950 a 1995 - %)

ANO	Rodoviário	Ferrovário	Cabotagem	Aéreo	Duto
1950	38	29,2	32,4	0,4	...
1960	60,3	18,8	20,8	0,1	...
1970	70,4	17,2	12,1	0,3	...
1980	58,7	24,5	13,1	0,3	3,4
1990	56,3	21,34	18,37	0,32	3,74
1996	62,72	20,72	11,46	0,31	3,79

Fonte: GEIPOT

1.2 Veículos para o Transporte de Cargas

Para o transporte de curta e média distâncias, encontram-se nas estradas caminhões com 2 eixos, chamados 4x2¹ ou com 3 eixos chamados 6x2² ou ainda os 6x4³. Este último com utilização mais restrita nos segmentos fora de estrada como no transporte de madeira, cana-de-açúcar e minério.

¹4x2 – Veículo com 4 pontos de apoio no solo sendo 2 com tração.

²6x2 – Veículo com 6 pontos de apoio no solo sendo 2 com tração.

³6x4 – Veículo com 6 pontos de apoio no solo sendo 4 com tração.

Para o transporte de grandes distâncias é mais comum a utilização de conjuntos formados por dois veículos: um veículo-trator e um veículo rebocado chamado semi-reboque. Esses conjuntos estão limitados pela Legislação vigente a um Peso Bruto Total - PBT máximo de 45 toneladas.

A Legislação que estabelece os limites de pesos e dimensões para os veículos de transporte terrestre é a Resolução 12/98 do CONTRAN [3].

1.3 Critérios Técnicos para Construção de Rodovias e sua relação com os tipos de veículos

As normas de projeto de rodovias no Brasil procuram agrupar as diferentes espécies de veículos automotores em um número limitado de tipos de veículos, cada um dos quais abrangendo veículos com características gerais similares.

Para cada tipo de veículo, as normas definem as características de um veículo representativo, permitindo o estabelecimento de parâmetros de projeto a serem observados para que a rodovia possa atender adequadamente aos veículos desse tipo.

As Normas do antigo DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem), hoje DNIT (Departamento Nacional de Infra-estrutura Terrestre) estabelecem, para fins de projeto, os 4 seguintes tipos básicos de veículos, que correspondem a parte dos utilizados pela AASHTO (American Association of State Highway & Transportation Officials), apenas com as denominações modificadas:

- veículo tipo VP , denominado genericamente por Veículo de Passageiros, compreendendo veículos leves, similares em termos geométricos e operacionais ao automóvel, incluindo vans, utilitários, pick-up's, furgões e similares;

- veículo tipo CO, denominado genericamente por Veículo Comercial Rígido, composto por unidade tratora simples (veículo não articulado), incluindo caminhões e ônibus convencionais, normalmente de 2 eixos e 6 rodas;
- veículo tipo O, denominado genericamente por Ônibus de Longo Percurso, abrangendo veículos comerciais rígidos de maiores dimensões, incluindo ônibus de turismo e caminhões longos, geralmente com 3 eixos, de dimensões maiores que o veículo tipo CO, com comprimentos próximos ao do limite máximo para veículos simples;
- veículo tipo SR, denominado genericamente por Semi-Reboque, representando os veículos comerciais articulados, com comprimento próximo ao limite para veículos articulados, sendo constituídos normalmente de uma unidade tratora simples com um semi-reboque.

Os tipos básicos fixados pelas Normas do DNER – VP, CO, O e SR – correspondem, respectivamente, aos veículos tipo P (*Passenger car*), SU (*Single Unit Truck*), BUS (*Single Unit Bus*) e WB-15 (*Semi-trailer Combination Large*) fixados pela AASHTO [4].

1.4 Carteira de habilitação dos motoristas e sua relação com os tipos de veículos.

O Código Brasileiro de Trânsito instituído pela Lei N.º 9.503, de 23 de setembro de 1997 prevê as seguintes categorias de motoristas, no seu Art. 143 [5]:

I - Categoria A - condutor de veículo motorizado de duas ou três rodas, com ou sem carro lateral;

II - Categoria B - condutor de veículo motorizado, não abrangido pela categoria A, cujo peso bruto total não exceda a três mil e quinhentos quilogramas e cuja lotação não exceda a oito lugares, excluído o do motorista;

III - Categoria C - condutor de veículo motorizado utilizado em transporte de carga, cujo peso bruto total exceda a três mil e quinhentos quilogramas;

IV - Categoria D - condutor de veículo motorizado utilizado no transporte de passageiros, cuja lotação exceda a oito lugares, excluído o do motorista;

V - Categoria E - condutor de combinação de veículos em que a unidade tratora se enquadre nas Categorias B, C ou D e cuja unidade acoplada, reboque, semi-reboque ou articulada, tenha seis mil quilogramas ou mais de peso bruto total, ou cuja lotação exceda a oito lugares, ou, ainda, seja enquadrado na categoria trailer.

Para habilitar-se na categoria C, o condutor deverá estar habilitado no mínimo há um ano na categoria B e não ter cometido nenhuma infração grave ou gravíssima, ou ser reincidente em infrações médias, durante os últimos doze meses.

1.5 A Evolução dos veículos para o Transporte de Cargas

Em 1998 a Resolução 68/98 do CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito estabeleceu os requisitos de segurança necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC, referidos nos artigos 97, 99 e 314 do Código Brasileiro de Trânsito, para combinações com mais de 2 unidades incluída a unidade tratora [6].

Publicada no Diário Oficial da União de 25 de setembro de 1998, essa Resolução trouxe alterações significativas na matriz do transporte rodoviário de cargas propiciando um rápido crescimento do volume de CVCs em circulação. Seu Anexo, publicado no Diário

Oficial da União de 28 de setembro de 1998, estabeleceu os tipos de composições de veículos autorizados e suas nomenclaturas [7].

A legislação anterior que tratava dessa matéria, a Resolução 631/84 do CONTRAN, impunha uma série de restrições adicionais como no art. 3º. que limitava o horário para trânsito com conjuntos de veículos entre 6:00h e 18:00h e seu limite de velocidade máxima de 60 km/h [8].

Liberado o trânsito diuturno para combinações com até 19,8 metros e sua velocidade máxima de 80 km/h pela nova Resolução 68/98, muitas transportadoras optaram pelos CVCs pelas vantagens econômicas oferecidas vinculadas a maior capacidade de carga líquida.

As principais Combinações de veículos, objetos desse estudo, em utilização atualmente no Brasil são:

- **Bi-trem:** trata-se um conjunto formado por 3 veículos sendo um veículo-trator com 3 eixos, um semi-reboque de 2 eixos com uma 5ª roda (dispositivo de engate) na traseira de seu chassi e mais um segundo semi-reboque também de dois eixos.

Esse conjunto tem um Peso Bruto Total - PBT de 57 toneladas, uma capacidade de carga líquida de aproximadamente 37 toneladas, dependendo do tipo de semi-reboque e do seu peso próprio, e 7 eixos no total.

Uma vantagem adicional desse conjunto comparado com aqueles de PBT acima de 57 toneladas reside no fato da Resolução permitir o tracionamento através de veículos do tipo 6x2 ou seja com um único diferencial e um eixo adicional chamado de Terceiro Eixo. São veículos mais baratos quando comparados com aqueles de duplo diferencial. Um exemplo desse tipo de CVC pode ser visto na Figura 1.



FIGURA 1 - Conjunto de Veículos de Carga do tipo Bi-trem. Cortesia: Pierino Gotti Indústria de Implementos Rodoviários Ltda

Trata-se do tipo de CVC em maior uso do país. Estima-se que existam algo em torno de 30.000 conjuntos circulando atendendo os mais variados segmentos do transporte, da safra agrícola ao transporte de produtos perigosos.

- **Rodotrem:** trata-se de um conjunto formado por 4 veículos sendo um veículo-trator com 3 eixos, um semi-reboque de 2 eixos com um engate na traseira de seu chassi, um “dolly” intermediário com 2 eixos e uma 5ª-roda instalada em sua estrutura e mais um segundo semi-reboque também de dois eixos.

Esse conjunto tem um Peso Bruto Total - PBT de 74 toneladas, uma capacidade de carga líquida de aproximadamente 52 toneladas, dependendo do tipo de semi-reboque e do seu peso próprio, e 9 eixos no total.

Comparado com o Bi-trem esse tipo de CVC trás a desvantagem da exigência do tracionamento por veículos do tipo 6x4 ou seja com duplo diferencial.

Esse tipo de CVC pode ser visto na Figura 2.



FIGURA 2 - Foto de Conjunto de Veículos de Carga do tipo Rodotrem. Cortesia: Noma do Brasil S/A

É raro no País a utilização no transporte convencional de conjuntos formados por caminhões tracionando reboques, os chamados “Romeu e Julieta”. Os outros tipos de conjuntos, previstos na Legislação, como por exemplo treminhão e tri-trem são veículos utilizados em aplicações específicas como por exemplo na área de cana-de-açúcar e exploração florestal, não sendo portanto, objeto deste trabalho.

Os conjuntos de veículos de cargas são também utilizados em outros países como Austrália, Nova Zelândia, Canadá e nos Estados Unidos. Neste último, o embargo do petróleo dos anos setenta e a conseqüente crise de combustíveis, aliados à redução do limite de velocidade geraram pressões para aumentar a produtividade dos caminhões (EICHER citado por REIS, 1989, p. 27)[9]. Os Estados que impunham restrições aos chamados “*twin Trailer Truck*” foram obrigados a permitir o uso desse tipo de combinação (TRB-SR 211 citado por REIS, 1986, p.29)[9], representando um evolução na legislação americana sobre configurações de veículos de carga.[9]

Em agosto de 2000, o Departamento Americano de Transporte (DOT) publicou seu estudo sobre tamanho e peso de caminhões. Esse estudo registra o significativo ganho de produtividade (ganhos líquidos entre U\$ 10 bilhões e U\$ 40 bilhões por ano) se combinações de veículos forem permitidas em mais estradas Americanas [10].

Canadá e Austrália, com grandes dimensões e geograficamente dispersos como os Estados Unidos, reformaram sua Regulamentação de tamanho e peso e tiveram significativo ganho na produtividade dos caminhões [10].

Há mais de meio século a Austrália tem permitido longos “*road trains*” com mais de 6 semi-reboques em operações rurais (“*outback*”) [10].

1.6 Características específicas de Conjuntos de Veículos de Carga

Devido a quantidade de articulações entre as unidades do conjunto, os CVCs estão sujeitos a fenômenos específicos que afetam significativamente a sua dirigibilidade e, por conseqüência, a sua segurança no trânsito.

Dentre as características peculiares desses CVCs destaca-se como a mais relevante o fenômeno conhecido como “amplificação traseira” (*rearward amplification*). Típico de veículos com muitas articulações, é chamada de amplificação traseira o aumento do deslocamento lateral da última unidade do conjunto quando comparada com o deslocamento lateral da primeira unidade, durante manobras em curvas ou manobras evasivas. Em consequência dessa amplificação do movimento a unidade traseira do conjunto é submetida a acelerações laterais maiores que a unidade tratora.

Mesmo presente também na configuração convencional de dois veículos - veículo-trator+semireboque, devido a sua pequena intensidade, pelo fato de existir uma única articulação, tem pouco impacto na questão da estabilidade lateral desses veículos.

Já nos conjuntos com 3 ou mais veículos, esse fenômeno passa a ter importância decisiva na dirigibilidade e segurança do trânsito desses veículos, tornando-se necessário um aprofundamento no estudo dos seus efeitos.

Segundo T. Gillespie [11], a amplificação traseira reduz o performance desses conjuntos e podem resultar em acidentes. Ocorreram muitos episódios desses nos anos 70 nos Estados Unidos e foram feitas muitas pesquisas para entendê-los.

Há fortes evidências de que os conjuntos de veículos de carga têm problema de tombamento lateral e tal problema está ligado a uma deficiência de segurança denominada amplificação traseira.

Demoras provocadas pelas articulações retardam, em certas situações, a percepção dos movimentos da traseira do veículo, diminuindo a capacidade do motorista em reagir adequadamente em situação críticas.(CASTER citado por REIS, 1987, p. 36)[9].

1.7 Critérios para Avaliação da Estabilidade Lateral de Veículos

A medida básica para avaliação da estabilidade lateral dos veículos é o chamado Limiar de Tombamento Lateral Estático - SRT (*Static Rollover Threshold*) expresso como a aceleração lateral, em g's, máxima antes de ocorrer o tombamento lateral do veículo [12].

Muitos automóveis apresentam SRT maior que 1 g enquanto camionetas e vans apresentam SRT entre 0,8 e 1,2. Já veículos pesados de carga apresentaram SRT abaixo de 0,5 g. Tanques criogênicos para o transporte de gases liquefeitos apresentam SRT tão baixo quanto 0,26 g. [12]. Assim, se a aceleração lateral gerada em uma curva ou manobra de emergência ultrapassar esse limite, o veículo, de forma inevitável, tombará.

Segundo Muller et al. [13], pode-se classificar os veículos de carga de acordo com seu SRT como:

Bom – com SRT acima de 0,35 g's

Marginal – com SRT entre 0,30 e 0,35 g's

Pobre – com SRT abaixo de 0,30 g's

Veículos com SRT abaixo de 0,3 g's têm risco de se envolver em acidentes do tipo tombamento 3 vezes maior que os demais.

A maior consequência da associação de veículos de carga com SRT baixo em combinações de veículos de carga, sujeitos portanto a amplificação do movimento traseiro, é o tombamento prematuro da unidade traseira. Ou seja, apesar do veículo-trator em determinada curva ou manobra e velocidade permanecer dentro de limites seguros de

aceleração lateral, a última unidade, pela fenômeno da amplificação traseira, pode ultrapassar seu limite e vir a tombar, levando consigo todo o conjunto.

Como o motorista, de certa forma, está isolado das unidades traseiras não existe meio ou recurso possível para que ele perceba que a última unidade está se aproximando do limiar de tombamento a tempo de evitar o acidente [WINKLER citado por SAMPSON, 2000, pag2][14]. Normalmente o motorista só percebe a eminência do acidente quando olha pelo retrovisor e percebe os pneus do lado interno da curva perdendo o contato com o solo. A partir desse instante normalmente o desastre é inevitável.

Uma vez que a aceleração lateral é função da velocidade do veículo e do raio da curva, pode-se deparar com a situação aonde um veículo convencional pode trafegar seguramente dentro da velocidade máxima permitida para aquele trecho, enquanto um CVC, pelo fenômeno físico da amplificação traseira, poderá ultrapassar o SRT da última unidade e provocar um acidente.

1.8 Acidentes Típicos

Acidentes com veículos de carga são geralmente graves ocasionando um número elevado de vítimas e danos econômicos importantes. Outro agravante são os danos ambientais que podem ocorrer pelo derramamento da carga, pois muitos veículos transportam produtos classificados como perigosos.

Alguns relatos de acidentes registrados pela mídia dão indícios de acidentes com conjuntos de veículos de cargas cuja causa provável está ligada ao fenômeno da amplificação traseira.

Desde acidentes pequenos, sem vítima e praticamente sem danos, como o mostrado na Figura 3 onde a segunda unidade de um bi-trem saiu da pista enquanto as demais permaneceram nela.



FIGURA 3 – Acidente com Conjunto do tipo Bi-trem na Rodovia BR-376

Até relatos como o do Motorista João Thomas publicado no Jornal A Tribuna de 25 de maio de 2002 que diz [15]:

“... O motorista freou para reduzir a velocidade para fazer a curva, olhou para a esquerda para confirmar a presença de algum veículo, e como não havia carro, soltou o breque e a carreta acabou tombando.”

“O motorista chegou a olhar pelo retrovisor e viu o **segundo container**, com mais de vinte toneladas de piche, caindo contra a calçada.”

Ainda na mesma reportagem encontra-se o seguinte trecho:

“... Thomas afirmou que o acidente não foi responsabilidade sua, uma vez que vinha prestando atenção na manobra. Não dei bobeira, disse ele, garantindo que realmente andava em baixa velocidade – e várias pessoas, como o agricultor, confirmaram que o veículo não vinha correndo.”[15]

Não houveram vítimas mas o prejuízo estimado no acidente foi em torno de R\$ 500.000,00 segundo a mesma reportagem.

Outro acidente foi registrado pelo Jornal O Globo de 12 de março de 2003 cujo título foi: “Carreta tomba, explode e motorista morre queimado” e relata no texto [16]:

“Uma carreta que transportava 45 mil litros de combustível tombou e explodiu ontem de manhã na Via Dutra, na descida das Serras das Araras,

A carreta bi-articulada – com dois tanques com capacidade de 22 e 23 mil litros



FIGURA 4 - Acidente com Conjunto do tipo Bi-trem na Serra das Araras

1.9 Objetivos

Comprovadamente representantes de uma evolução dos veículos utilizados no transporte de cargas pelo ganho de produtividade que proporcionam os CVCs também precisam ser observados sob a ótica de suas características de dirigibilidade e segurança e os impactos que o aumento do volume de CVCs em circulação pode causar nas estatísticas de acidentes.

Faz-se necessários que os fabricantes dos caminhões e dos veículos rebocados desenvolvam projetos que prevejam e minimizem o efeito da amplificação traseira e principalmente ensaios para determinar o SRT de cada modelo para que possa orientar os proprietários e motoristas, garantindo um trânsito mais seguro.

Aspectos importantes como a revisão dos critérios técnicos para construção de rodovias, suas obras de arte e sinalização viária incluindo as necessidades específicas impostas pelos CVCs devem ser feitas pelos órgãos competentes.

Também necessário se faz, por parte dos órgãos competentes, a inclusão de instruções específicas nos Centro de Formação de Condutores, para os motoristas desses conjuntos, visando minimizar a possibilidade de ocorrência de acidentes causados pela amplificação traseira. Talvez justificável seja a inclusão de uma nova Classe de motoristas com treinamento específico para CVCs.

Um estudo para a determinação da razão da Amplificação Traseira dos principais tipo de CVCs em circulação no País é pré-requisito para avaliação das necessidades acima. Faz-se necessário conhecer a amplitude do fenômeno para cada modelo de forma a permitir a necessária evolução/correção dos projetos do veículos, rodovias, sinalização viária e na formação dos condutores.

Este é o objetivo deste trabalho. Pelo método Estruturalista, a partir da investigação de um fenômeno concreto elevá-lo ao nível abstrato, por intermédio da construção de um modelo matemático que represente os modelos mais comuns de CVCs, retomando por fim o nível concreto, desta vez com a realidade estruturada e relacionada com a experiência.

2. MODELAMENTO MATEMÁTICO DOS CVCS

2.1 Referencial Teórico

Segundo H. Dugoff [17] o primeiro documento de pesquisa sobre a dinâmica direcional de veículos articulados foi desenvolvido em 1937 por L. Huber e O. Dietz no Automotive Research Institute at Stuttgart na Alemanha.

A investigação de Huber e Dietz foi experimental, consistindo primordialmente em um modelo em escala acompanhado por um programa de teste para avaliação de um reboque de 2 eixos.

O experimento de Huber e Dietz foi seguido por um complemento teórico elaborado por H. Ziegler em Stuttgart [17]. Dentre as simplificações desse modelo matemático, a menos defensável foi desconsiderar a influência do escorregamento lateral - “sideslip” dos pneus em curvas.

Com o advento de computadores facilitou-se a solução de equações complexas que descrevem o movimento de veículos articulados e muitos outros trabalhos foram desenvolvidos. Dentre eles os elaborados por Hales, Jindra, Ellis, Schmid and Kullberg analisaram a estabilidade dinâmica de veículos articulados com três eixos movendo-se com velocidade longitudinal constante [17].

Destacam-se também os trabalhos “Simulação de Dirigibilidade (*handling*) de trator-semireboque” de A.I. Krauter e R.K. Wilson [20] em 1972 e “Dinâmica de veículos

trator–semireboque: o problema do efeito canivete” [21] com um modelamento matemático para estudo desse tipo de acidente, comum em veículos articulados.

Outro trabalho na área é o desenvolvido por C. MacAdam sobre a estabilidade de veículos pesados com centro de gravidade alto [17].

E. Esmailzadeh [18] também desenvolveu trabalho sobre o performance direcional e a estabilidade lateral de veículos articulados, especificamente aqueles com dolly intermediário para o transporte de cargas indivisíveis como por exemplo o transporte de toras longas (chamados no seu trabalho de “*doglogger*”).

F. Jindra [19] elaborou trabalho sobre as Características de Dirigibilidade de combinações de trator–semireboque através de um método simplificado de análise linear dos movimentos de um conjunto de veículos consistindo de um trator de 2 eixos, um semi–reboque de 1 eixo, 1 dolly intermediário também de 1 eixo e mais um semi–reboque de 1 eixo, totalizando 4 veículos e 3 articulações.

Como esse modelo se aproxima em muito ao do rodotrem, será a base para este trabalho sofrendo as adaptações necessárias para a quantidade de eixos e, no caso do bi–trem, do número de veículos e articulações.

2.2 Modelamento Matemático

2.2.1 Análise Cinemática:

Seja um conjunto de veículos trafegando em velocidade longitudinal constante em uma estrada plana. Considera-se o sistema de referência com origem no centro de gravidade de cada unidade do conjunto.

Para efeito de simplificação dos modelos são consideradas as seguintes características:

- Os veículos são rígidos à torção e com centro de gravidade em uma posição fixa (não há movimentação da carga dentro dos veículos);
- O movimento relativo entre os eixos e o chassi dos veículos é desprezado;
- Assume-se também que o acoplamento entre 5ª-roda e pino-rei e o engate do dolly intermediário possui atrito desprezável;
- São consideradas as forças transmitidas da pista para os pneus como as únicas forças externas aplicadas sobre os veículos;
- O efeito da transferência de carga entre os lados dos veículos em curvas é desprezado;
- Resistência ao rolamento, forças aerodinâmicas e o momento causado pela existência de duplos pneus são desprezados.
- Todos os ângulos são considerados pequenos o suficiente para que se admita que:
 $\sin \phi \cong \phi$, $\cos \phi \cong 1$ e $\tan \phi \cong \phi$.
- São considerados pequenos os ângulos de deriva - “*sideslip*”.

Se $\mathbf{i}$ e $\mathbf{j}$ são os versores unitários do sistema de referência do veículo pode-se escrever que o vetor velocidade, para o movimento plano, de um veículo é:

$$V = u \mathbf{i} + v \mathbf{j} \quad (1)$$

Derivando em relação ao tempo obtêm-se o vetor aceleração $\mathbf{a}$:

$$\mathbf{a} = \frac{du}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv}{dt} \mathbf{j} + u \frac{d\mathbf{i}}{dt} + v \frac{d\mathbf{j}}{dt} \quad (2)$$

mas $d\mathbf{i}/dt = \omega \mathbf{j} \rightarrow$ onde ω = velocidade angular em torno do eixo “z”

e $d\mathbf{j}/dt = -\omega \mathbf{i}$ conforme pode ser observado na Figura 5.

Portanto tem-se:

$$\mathbf{a} = (\dot{u} - v\omega) \mathbf{i} + (\dot{v} + u\omega) \mathbf{j} \quad (3)$$

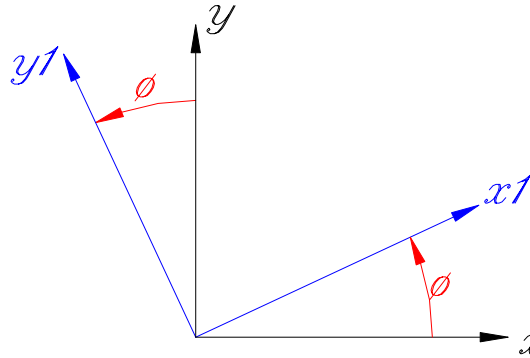


FIGURA 5 - Sistema de referência

onde $\dot{u} = du/dt$ e $\dot{v} = dv/dt$

Portanto:

$$\sum F_x = m(\dot{u} - v\omega) \quad \text{e} \quad \sum F_y = m(\dot{v} + u\omega) \quad (4)$$

2.2.2 Modelamento do Bi-trem

Seja um conjunto do tipo bi-trem conforme ilustrado na Figura 6:

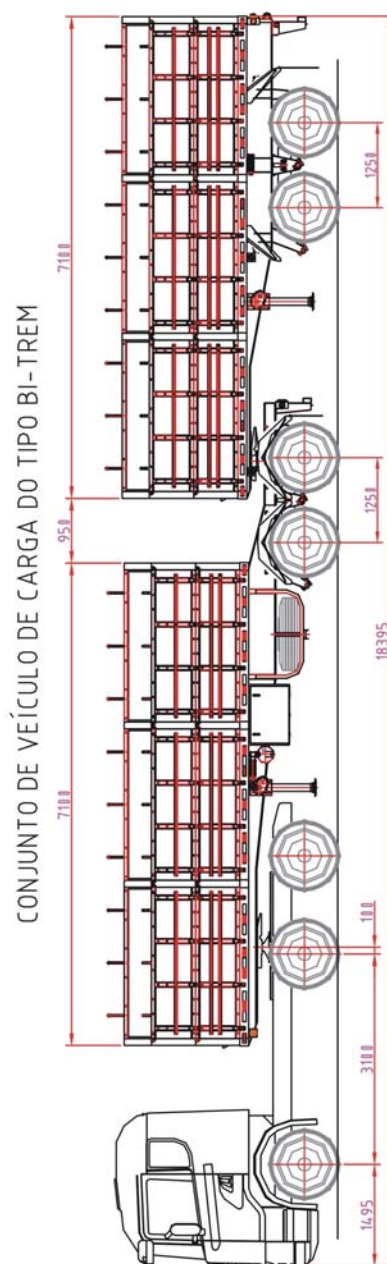


FIGURA 6 - Ilustração do Modelo Bi-trem (em mm) – Cortesia: Indústria Metalúrgica Pastre Ltda

O Conjunto possui 2 articulações e 7 eixos no total. As dimensões principais podem ser observadas na Figura 7:

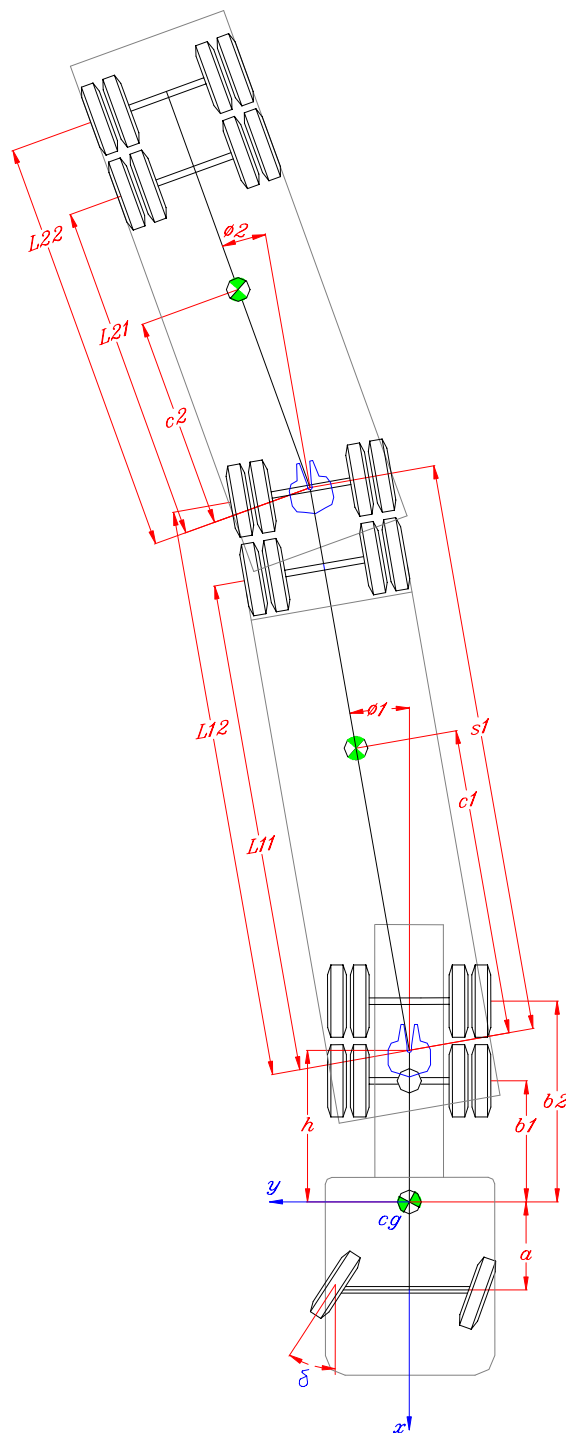


FIGURA 7 - Modelo Bi-trem - Dimensões principais

2.2.3 Equações do Movimento para o Bi-trem

2.2.3.1 Para o veículo-trator

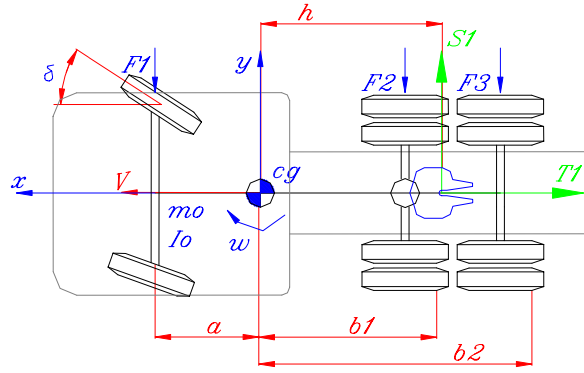


FIGURA 8 - Veículo-trator

Aplicando-se as Leis de Newton para o equilíbrio das forças:

$$\sum Fy = m.a \rightarrow m_0.(\dot{v} + V.\omega) = -F_1 - F_2 - F_3 + S_1 \quad (5)$$

Para o equilíbrio de momentos:

$$I_0.\dot{\omega} = -a.F_1 + b_1.F_2 + b_2.F_3 - h.S_1 \quad (6)$$

2.2.3.2 Para o primeiro semi-reboque

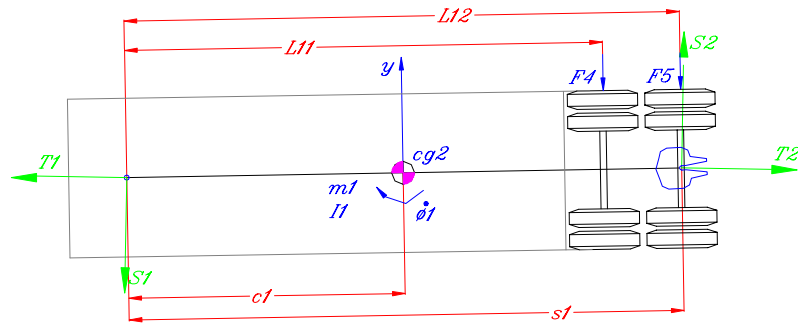


FIGURA 9 - Primeiro semi-reboque

$$0 = T_1 - T_2 - (F_4 + F_5) \cdot \sin \phi_1 \quad \text{mas } \sin \phi \cong \phi \text{ então, tem-se:}$$

$$0 = T_1 - T_2 - (F_4 + F_5) \cdot \phi_1 \quad (7)$$

$$m_1 \cdot [\dot{v} + V \cdot \omega - (h + c_1) \cdot \dot{\omega} - c_1 \cdot \ddot{\phi}_1] = -(F_4 + F_5) - S_1 + S_2 \quad (8)$$

$$I_1 \cdot (\dot{\omega} + \ddot{\phi}_1) = -c_1 \cdot S_1 - c_1 \cdot T_1 \cdot \phi_1 + (L_{11} - c_1) \cdot F_4 + (L_{12} - c_1) \cdot F_5 - (s_1 - c_1) \cdot S_2 - (s_1 - c_1) \cdot T_2 \cdot \phi_1 \quad (9)$$

2.2.3.3 Para o segundo semi-reboque

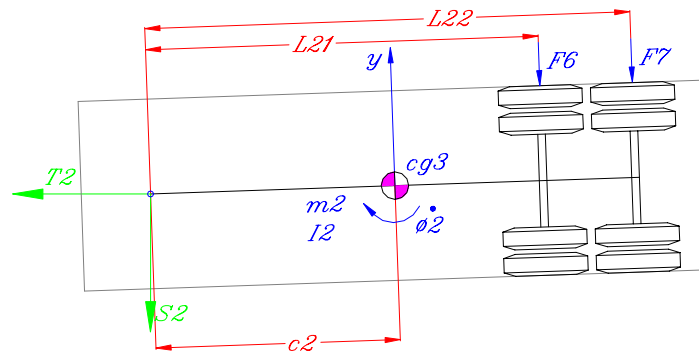


FIGURA 10 - Segundo semi-reboque

$$0 = T_2 - (F_6 + F_7) \cdot \phi_2 \quad (10)$$

$$m_2 \cdot [\dot{v} + V \cdot \omega - (h + s_1 + c_2) \cdot \dot{\omega} - s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 - c_2 \cdot \ddot{\phi}_2] = -(F_6 + F_7) - S_2 \quad (11)$$

$$I_2 \cdot (\dot{\omega} + \ddot{\phi}_2) = -c_2 \cdot S_2 - c_2 \cdot T_2 \cdot \phi_2 + (L_{21} - c_2) \cdot F_6 + (L_{12} - c_2) \cdot F_7 \quad (12)$$

Eliminando-se as reações de acoplamento através da soma das equações (5), (9) e (11) tem-se:

$$-\sum_{i=1}^{i=7} F_i = (m_0 + m_1 + m_2).(\dot{v} + V.\omega) - [m_1.(h + c_1) + m_2.(h + s_1 + c_2)].\dot{\omega} - (m_1.c_1 + m_2.s_1).\ddot{\phi}_1 - m_2.c_2.\ddot{\phi}_2 \quad (13)$$

Multiplicando-se a equação (5) por h , isolando-se o termo $h.S_1$ e substituindo-se em (6):

$$m_0.(\dot{v} + V.\omega) + I_0.\dot{\omega} = -(a + h).F_1 + (b_1 - h).F_2 + (b_2 - h).F_3 \quad (14)$$

Somando-se as equações (7) e (10) obtêm-se a equação:

$$T_1 = (F_4 + F_5).\phi_1 + (F_6 + F_7).\phi_2 \quad (15)$$

Da equação (10) tem-se que:

$$T_2 = (F_6 + F_7).\phi_2 \quad (16)$$

Somando-se as equações (8) e (11) pode-se isolar o valor de S_1 :

$$S_1 = -m_1.[(\dot{v} + V.\omega) - (h + c_1).\dot{\omega} - c_1.\ddot{\phi}_1] - \sum_{i=1}^{i=7} F_i - m_2.[(\dot{v} + V.\omega) - (h + s_1 + c_2).\dot{\omega} - s_1.\ddot{\phi}_1 - c_2.\ddot{\phi}_2] \quad (17)$$

Da equação (11) pode-se isolar o valor de S_2

$$S_2 = -m_2.[\dot{v} + V.\omega - (h + s_1 + c_2).\dot{\omega} - s_1.\ddot{\phi}_1 - c_2.\ddot{\phi}_2] - (F_6 + F_7) \quad (18)$$

Substituindo-se as equações (15), (16), (17) e (18) na equação (9), desprezando-se os termos quadráticos de ϕ e reagrupando os demais termos tem-se:

$$-(m_1.c_1 + m_2.s_1).(\dot{v} + V.\omega) + [I_1 + m_1.c_1.(h + c_1) + m_2.s_1.(h + s_1 + c_2)]\dot{\omega} + (I_1 + m_1.c_1^2 + m_2.s_1^2).\ddot{\phi}_1 + m_2.c_2.s_1.\ddot{\phi}_2 = L_{11}.F_4 + L_{12}.F_5 + s_1.(F_6 + F_7) \quad (19)$$

Para o segundo semi-reboque – substituindo-se as equações (18), (16) e (15) na equação (12) tem-se:

$$m_2.c_2.(\dot{v} + V.\omega) + [I_2 + m_2.c_2.(h + s_1 + c_2)]\dot{\omega} + m_2.c_2.s_1.\ddot{\phi}_1 + (m_2.c_2^2 + I_2).\ddot{\phi}_2 = L_{21}.F_6 + L_{22}.F_7 \quad (20)$$

Nessas equações tem-se representadas as características de massa e inércia do sistema de um lado e do outro lado as forças externas e momentos que atuam no modelo simplificado.

As forças externas são criadas no plano do piso entre o pneu e a pista.

Forças Laterais em Pneus:

Assumindo-se que para pequenos ângulos a Rigidez Lateral (*Cornering Stiffness*) é linear, tem-se a seguinte equação geral:

$$F_j = N_j \cdot \alpha_j \quad (21)$$

com $j = 1, 2, \dots, 7$

N_j = Rigidez Torcional (*Cornering Stiffness*) combinado do eixo j .

α_j = Ângulo de deriva no eixo j .

A força lateral em cada pneu dependerá também da força vertical aplicada no eixo em consequência da distribuição de peso do conjunto de veículos.

“*Slip angle*” – Ângulo de Deriva:

É o ângulo entre o vetor velocidade do pneu e seu plano vertical conforme ilustrado na Figura 11.

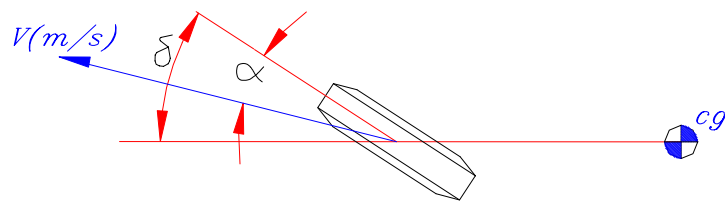


FIGURA 11 - Ângulo de esterçamento e ângulo de deriva

Para o pneu dianteiro do veículo-trator com um ângulo de esterçamento (*steer angle*) δ , o ângulo de deriva - “*slip angle*” pode ser aproximado por [19]:

$$\alpha_1 = (v + a.\omega) / V - \delta \quad (22)$$

O “*slip angle*” para o 2º e 3º eixo do veículo–trator podem ser aproximados por:

$$\alpha_2 = (v - b_1.\omega) / V \quad (23)$$

$$\alpha_3 = (v - b_2.\omega) / V \quad (24)$$

As expressões do “*slip angle*” dos eixos do semi–reboque podem ser aproximadas por:

$$\alpha_4 = [v - (h + L_{11}).\omega - L_{11}.\dot{\phi}_1] / V - \phi_1 \quad (25)$$

$$\alpha_5 = [v - (h + L_{12}).\omega - L_{12}.\dot{\phi}_1] / V - \phi_1 \quad (26)$$

$$\alpha_6 = [v - (h + s_1 + L_{21}).\omega - s_1.\dot{\phi}_1 - L_{21}.\dot{\phi}_2] / V - \phi_2 \quad (27)$$

$$\alpha_7 = [v - (h + s_1 + L_{22}).\omega - s_1.\dot{\phi}_1 - L_{22}.\dot{\phi}_2] / V - \phi_2 \quad (28)$$

2.2.3.4 Equações gerais do conjunto de veículos

Substituindo-se as equações de F e α e isolando-se os termos das equações (13), (14), (19) e (20) tem-se:

$$\begin{aligned} & (m_0 + m_1 + m_2).\dot{v} + \left(\sum_{i=1}^{i=7} F_i\right).v / V - (m_1' + m_2').\dot{\omega} + [(m_0 + m_1 + m_2).V^2 - (N_1' + N_2' + N_3' + N_4' + \\ & N_5' + N_6' + N_7')].\omega / V - (m_1.c_1 + m_2.s_1).\ddot{\phi}_1 - [N_4.L_{11} + N_5.L_{12} + (N_6 + N_7).s_1].\dot{\phi}_1 / V - \\ & (N_4 + N_5).\phi_1 - m_2.c_2.\ddot{\phi}_2 - (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).\dot{\phi}_2 / V - (N_6 + N_7).\phi_2 = N_1.\delta \end{aligned} \quad (29)$$

Onde:

$$m_1' = m_1.(h + c_1)$$

$$m_2' = m_2.(h + s_1 + c_2)$$

$$N_1' = -N_1.a$$

$$N_2' = N_2.b_1$$

$$N_3' = N_3.b_2$$

$$N_4' = N_4.(h + L_{11})$$

$$N_5' = N_5.(h + L_{12})$$

$$N_6' = N_6.(h + s_1 + L_{21})$$

$$N_7' = N_7.(h + s_1 + L_{22})$$

$$m_0.h.\dot{v} + [(N_1 + N_2 + N_3).h - N_1' - N_2' - N_3'].v/V + I_0.\dot{\omega} + [m_0.h.V^2 + N_1'.a^2 + N_2'.b_1^2 + N_3'.b_2^2 - (N_1' + N_2' + N_3').h].\omega/V = N_1.(a + h).\delta \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & - (m_1.c_1 + m_2.s_1).\dot{v} - [N_4.L_{11} + N_5.L_{12} + (N_6 + N_7).s_1].v/V + (I_1 + m_1'.c_1 + m_2'.s_1).\dot{\omega} - \\ & [(m_1.c_1 + m_2.s_1).V^2 - N_4'.L_{11} - N_5'.L_{12} - (N_6' + N_7').s_1].\omega/V + (I_1 + m_1'.c_1^2 + m_2'.s_1^2).\ddot{\phi}_1 + \\ & [N_4.L_{11}^2 + N_5.L_{12}^2 + (N_6 + N_7).s_1^2].\dot{\phi}_1/V + (N_4.L_{11} + N_5.L_{12}).\phi_1 + (m_2.c_2.s_1).\ddot{\phi}_2 + (N_6.L_{21} + \\ & N_7.L_{22}).s_1.\dot{\phi}_2/V + (N_6 + N_7).s_1.\phi_2 = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
& -m_2 \cdot c_2 \cdot \dot{v} - (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot v / V + (I_2 + m_2 \cdot c_2) \cdot \dot{\omega} - (m_2 \cdot c_2 \cdot V^2 - N_6 \cdot L_{21} - N_7 \cdot L_{22}) \cdot \omega / V + \\
& m_2 \cdot c_2 \cdot s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 + (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot s_1 \cdot \dot{\phi}_1 / V + (I_2 + m_2 \cdot c_2^2) \cdot \ddot{\phi}_2 + (N_6 \cdot L_{21}^2 + N_7 \cdot L_{22}^2) \cdot \dot{\phi}_2 / V + \\
& (N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22}) \cdot \phi_2 = 0
\end{aligned}
\tag{32}$$

O Sistema de Equações poderá ser representado por:

$$[A] \cdot \{y\} = [B] \cdot \{x\}$$

onde:

$$\{y\}_{4 \times 1} = \begin{Bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \end{Bmatrix}$$

e

$$\{x\}_{7 \times 1} = \begin{Bmatrix} v \\ \omega \\ \dot{\phi}_1 \\ \phi_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \phi_2 \\ \delta \end{Bmatrix}$$

Portanto:

$$\{y\} = [A]^{-1} \cdot [B] \cdot \{x\} = [C] \cdot \{x\}$$

$$\text{onde: } [A]_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} m_0 + m_1 + m_2 & -(m_1' + m_2') & -(m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot s_1) & -(m_2 \cdot c_2) \\ m_0 \cdot h & I_0 & 0 & 0 \\ -(m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot s_1) & I_1 + m_1' \cdot c_1 + m_2' \cdot s_1 & I_1 + m_1 \cdot c_1^2 + m_2 \cdot s_1^2 & m_2 \cdot c_2 \cdot s_1 \\ -m_2 \cdot c_2 & I_2 + m_2' \cdot c_2 & m_2 \cdot c_2 \cdot s_1 & I_2 + m_2 \cdot c_2^2 \end{bmatrix}$$

$$[B]_{4 \times 7} = \begin{bmatrix} -(\sum_{i=1}^{1=7} Ni) / V & -(m_0 + m_1 + m_2).V + (\sum_{i=1}^{1=7} N_i') / V & [N_4.L_{11} + N_5.L_{12} + (N_6 + N_7).s_1] / V & N_4 + N_5 & (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}) / V & N_6 + N_7 & N_1 \\ [- (N_1 + N_2 + N_3).h + N_1' + N_2' + N_3'] / V & -m_0.hV + [-N_1.a_1^2 - N_2.b_1^2 - N_3.b_2^2 + (N_1' + N_2' + N_3').h] / V & 0 & 0 & 0 & 0 & N_1.(a + h) \\ [N_4.L_{11} + N_5.L_{12} + (N_6 + N_7).s_1] / V & (m_1.c_1 + m_2.s_1).V - [N_4'.L_{11} + N_5'.L_{12} + (N_6' + N_7').s_1] / V & -[N_4.L_{11}^2 + N_5.L_{12}^2 + (N_6 + N_7).s_1^2] / V & -(N_4.L_{11} + N_5.L_{12}) & -(N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).s_1 / V & (-N_6 + N_7).s_1 & 0 \\ (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}) / V & m_2.c_2.V - (N_6'.L_{21} + N_7'.L_{22}) / V & -(N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).s_1 / V & 0 & -(N_6.L_{21}^2 + N_7.L_{22}^2) / V & (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}) & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.3.5 Simulação Dinâmica:

Para a simulação dinâmica do Sistema de Equações acima definido para o conjunto Bi-trem, foram considerados os dados de entrada de acordo com as especificações fornecidas pelos fabricantes dos semi-reboques constantes no Anexo I.

Os Momentos de Inércia foram calculados com auxílio de software de CAD (*Computer Aided Design*), para as diversas condições de carregamento.

Considerou-se que os veículos estão equipados com pneus Michelin XZA, cujos valores de Coeficiente de Curva (*Cornering Coefficient*) foram obtidos do livro “*Theory of Ground Vehicles*” – pag. 34 [23]. A Rigidez Torcional (*Cornering Stiffness*) de cada eixo foi obtida considerando-se a carga vertical atuando em cada pneu nas seguintes condições:

- Carregado (com carga máxima de acordo com o PBT para o conjunto);
- Vazio (com peso em ordem de marcha);
- Com o primeiro semi-reboque vazio e o segundo carregado.

Para os casos de carregamento acima, foram simulados ainda duas condições de ângulo de esterçamento como entrada do sistema, conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13:

- Esterçamento do volante em forma de degrau, com amplitude de 1°. aplicado no tempo zero.
- Esterçamento em forma senoidal de 1° de amplitude aplicado de zero a dois segundos.

Foram plotados os resultados a uma velocidade de deslocamento longitudinal de 70 km/h e ainda comparados com os mesmos resultados a 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h para cada uma das condições acima de acordo com as Figuras 42 e 43.

Os Resultados da simulação dinâmica estão apresentados no Capítulo 4.

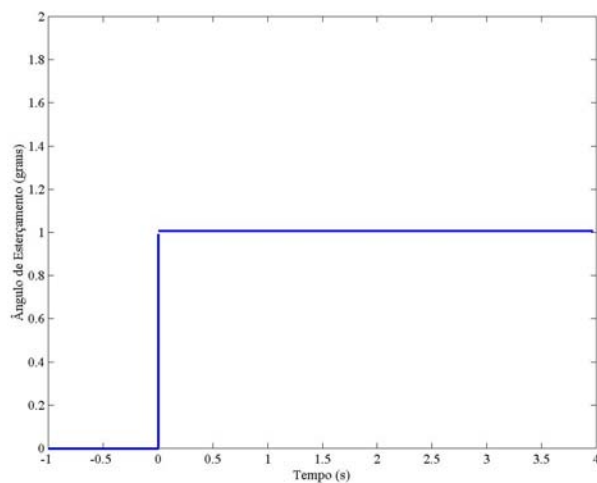


FIGURA 12 – Ilustração do esterçamento do volante em forma de degrau.

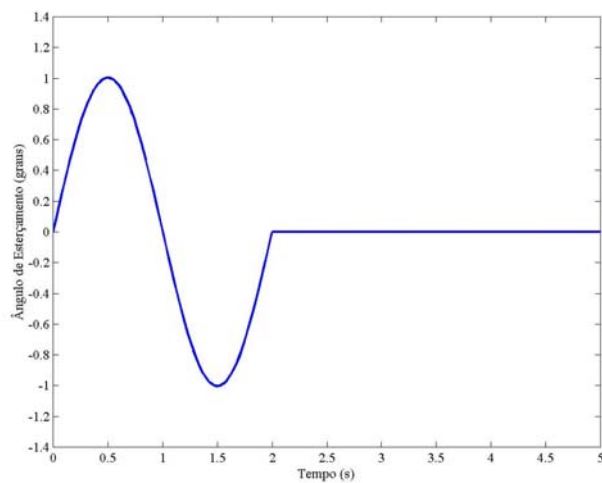


FIGURA 13 – Ilustração do esterçamento do volante em forma senoidal.

2.2.4 Modelamento do Rodotrem

Seja um conjunto do tipo Rodotrem conforme ilustrado na Figura 14.

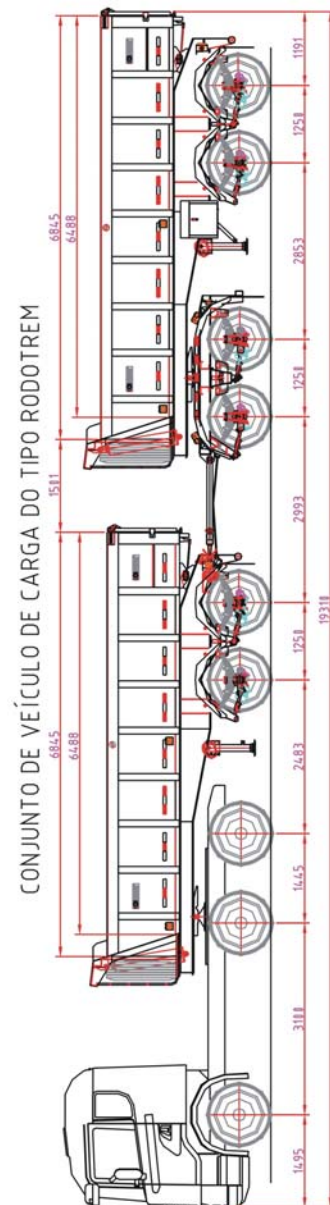


FIGURA 14 - Ilustração do Modelo Rodotrem (em mm) – Cortesia: Ind. Metalúrgica Pastre Ltda

O Conjunto possui 3 articulações e 9 eixos no total. As dimensões principais podem ser observadas na Figura 15.

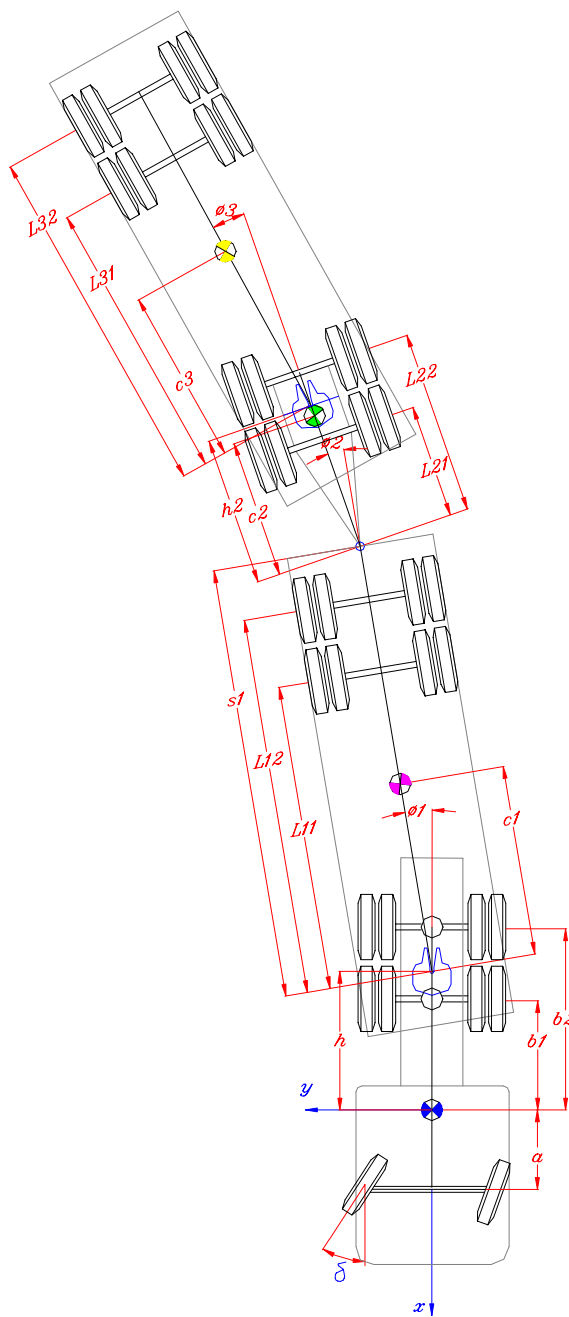


FIGURA 15 - Modelo Rodotrem - Dimensões principais

2.2.5 Equações do Movimento

2.2.5.1 Para o veículo-trator

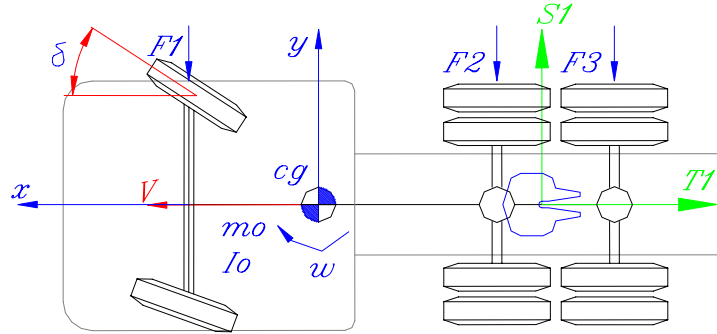


FIGURA 16 - Veículo-Trator – Rodotrem

$$\sum Fy = m.a \rightarrow m_0.(\dot{v} + V.\omega) = -F_1 - F_2 - F_3 + S_1 \quad (33)$$

$$I_0.\dot{\omega} = -a.F_1 + b_1.F_2 + b_2.F_3 - h.S_1 \quad (34)$$

2.2.5.2 Para o primeiro semi-reboque

$$0 = T_1 - T_2 - (F_4 + F_5). \sin \phi_1 \quad \text{mas } \sin \phi \cong \phi$$

$$0 = T_1 + T_2 - (F_4 + F_5). \phi_1$$

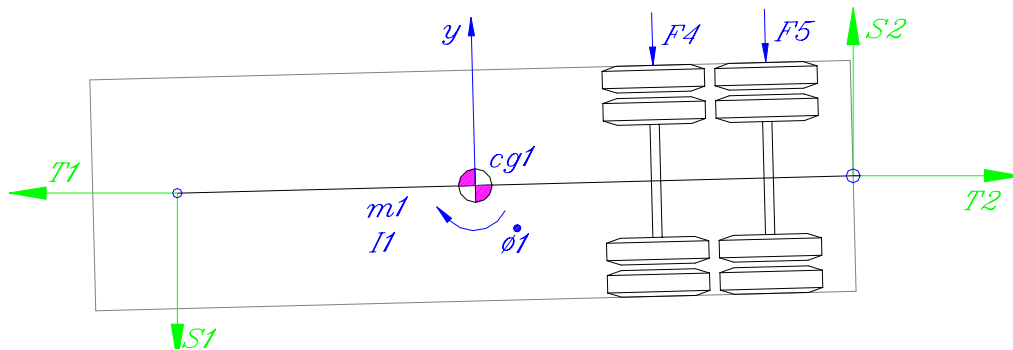


FIGURA 17 - Primeiro semi-reboque - Rodotrem

$$m_1.[\dot{v} + V.\omega - (h + c_1).\dot{\omega} - c_1.\ddot{\phi}_1] = -(F_4 + F_5) - S_1 + S_2 \quad (36)$$

$$I_1.(\dot{\omega} + \ddot{\phi}_1) = -c_1.S_1 - c_1.T_1.\phi_1 + (L_{11} - c_1).F_4 + (L_{12} - c_1).F_5 - (s_1 - c_1).S_2 - (s_1 - c_1).T_2.\phi_1 \quad (37)$$

2.2.5.3 Para o dolly intermediário

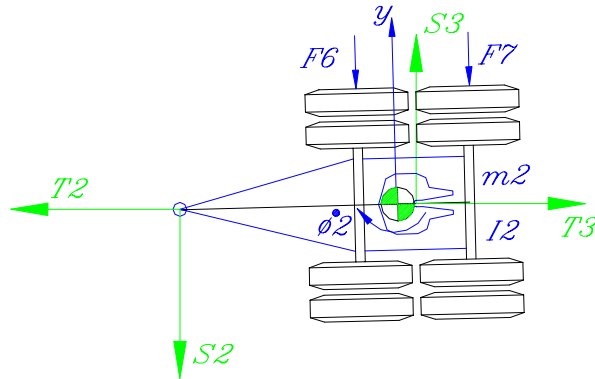


FIGURA 18 - Dolly Intermediário

$$0 = T_2 - (F_6 + F_7).\phi_2 \quad (38)$$

$$m_2.[\dot{v} + V.\omega - (h + s_1 + c_2).\dot{\omega} - s_1.\ddot{\phi}_1 - c_2.\ddot{\phi}_2] = -(F_6 + F_7) - S_2 + S_3 \quad (39)$$

$$I_2.(\dot{\omega} + \ddot{\phi}_2) = -c_2.S_2 - c_2.T_2.\phi_2 - (c_2 - L_{21}).F_6 + (L_{12} - c_2).F_7 - S_3.(h_2 - c_2) - T_3.\phi_2.(h_2 - c_2) \quad (40)$$

2.2.5.4 Para o segundo semi-reboque

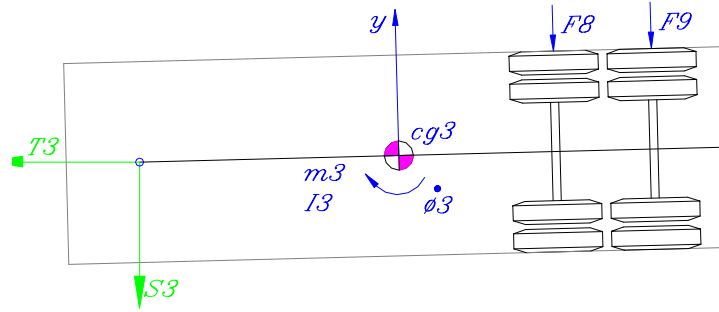


FIGURA 19 - Segundo semi-reboque - Rodotrem

$$0 = T_3 - (F_8 + F_9) \cdot \phi_3 \quad (41)$$

$$m_3 \cdot [\dot{v} + V \cdot \omega - (h + s_1 + h_2 + c_3) \cdot \dot{\omega} - s_1 \cdot \ddot{\phi}_1 - h_2 \cdot \ddot{\phi}_2 - c_3 \cdot \ddot{\phi}_3] = -(F_8 + F_9) - S_3 \quad (42)$$

$$I_3 \cdot (\dot{\omega} + \ddot{\phi}_3) = -c_3 \cdot S_3 - c_3 \cdot T_3 \cdot \phi_3 + (L_{31} - c_3) \cdot F_8 + (L_{32} - c_3) \cdot F_9 \quad (43)$$

Eliminando-se as reações de acoplamento através da soma das equações (33), (36), (39) e (42) tem-se:

$$\sum_{i=1}^{i=9} F_i = (m_0 + m_1 + m_2 + m_3) \cdot (\dot{v} + V \cdot \omega) - [m_1 \cdot (h + c_1) + m_2 \cdot (h + s_1 + c_2) + m_3 \cdot (h + s_1 + h_2 + c_3)] \cdot \dot{\omega} - [m_1 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \cdot \ddot{\phi}_1 - (m_2 \cdot c_2 - m_3 \cdot h_2) \cdot \ddot{\phi}_2 - m_3 \cdot c_3 \cdot \ddot{\phi}_3 \quad (44)$$

Multiplicando-se a equação (33) por h , isolando-se o termo $h \cdot S_1$ e substituindo-se em (34) tem-se:

$$m_0.(\dot{v} + V.\omega) + I_0.\dot{\omega} = -(a + h).F_1 + (b_1 - h).F_2 + (b_2 - h).F_3 \quad (45)$$

Somando-se as equações (35), (38) e (41) obtêm-se a equação:

$$T_1 = (F_4 + F_5).\phi_1 + (F_6 + F_7).\phi_2 + (F_8 + F_9).\phi_3 \quad (46)$$

Das equações (38) e (41) obtêm-se:

$$T_2 = (F_6 + F_7).\phi_2 + (F_8 + F_9).\phi_3 \quad (47)$$

Somando-se as equações (36), (39) e (42) pode-se isolar o valor de S_1 :

$$\begin{aligned} S_1 = & -m_1.[(\dot{v} + V.\omega) - (h + c_1).\dot{\omega} - c_1.\ddot{\phi}_1] - \sum_{i=1}^{i=9} F_i - m_2.[(\dot{v} + V.\omega) - (h + s_1 + c_2).\dot{\omega} - s_1.\ddot{\phi}_1 - c_2.\ddot{\phi}_2] - \\ & m_3.[(\dot{v} + V.\omega) - (h + s_1 + h_2 + c_3).\dot{\omega} - s_1.\ddot{\phi}_1 - h_2.\ddot{\phi}_2 - c_3.\ddot{\phi}_3] \end{aligned} \quad (48)$$

Da equação (39) e (41) pode-se isolar o valor de S_2

$$\begin{aligned} S_2 = & -m_2.[(\dot{v} + V.\omega) - (h + s_1 + c_2).\dot{\omega} - s_1.\ddot{\phi}_1 - c_2.\ddot{\phi}_2] - m_3.[(\dot{v} + V.\omega) - (h + s_1 + h_2 + c_3).\dot{\omega} - s_1.\ddot{\phi}_1 - \\ & h_2.\ddot{\phi}_2 - c_3.\ddot{\phi}_3] - (F_6 + F_7 + F_8 + F_9) \end{aligned} \quad (49)$$

Substituindo-se essas equações na equação (37), desprezando-se os termos quadráticos de ϕ e reagrupando os demais termos tem-se:

$$\begin{aligned}
 & -[m_1.c_1 + (m_2 + m_3).s_1].(\dot{v} + V.\omega) + [I_1 + m_1.c_1.(h + c_1) + m_2.s_1.(h + s_1 + c_2) + m_3.s_1.(h + s_1 + \\
 & h_2 + c_3)].\dot{\omega} + [I_1 + m_1.c_1^2 + (m_2 + m_3).s_1^2].\ddot{\phi}_1 + (m_2.c_2 + m_3.h_2).s_1.\ddot{\phi}_2 + m_3.c_3.s_1.\ddot{\phi}_3 = \\
 & L_{11}.F_4 + L_{12}.F_5 + s_1.(F_6 + F_7 + F_8 + F_9)
 \end{aligned} \tag{50}$$

Para o dolly, substituindo-se as equações anteriores para T_2 , S_1 e S_2 na equação (40) e extraíndo o valor de S_3 da equação (42) e o valor de T_3 da equação (41) tem-se:

$$\begin{aligned}
 & -(m_2.c_2 + m_3.h_2).(\dot{v} + V.\omega) + [I_2 + m_2.c_2.(h + s_1 + c_2) + m_3.h_2.(h + s_1 + h_2 + c_3)].\dot{\omega} + (m_2.c_2 + \\
 & m_3.h_2).s_1.\ddot{\phi}_1 + [m_3.h_2^2 + m_2.c_2^2 + I_2].\ddot{\phi}_2 = L_{21}.F_6 + L_{22}.F_7 + h_2.(F_8 + F_9)
 \end{aligned} \tag{51}$$

Para o segundo semi-reboque, substituindo-se os valores de S_3 e T_3 na equação (43) tem-se:

$$\begin{aligned}
 & -m_3.c_3.(\dot{v} + V.\omega) + [I_3 + m_3.c_3.(h + s_1 + h_2 + c_3)].\dot{\omega} + m_3.c_3.s_1.\ddot{\phi}_1 + m_3.c_3.h_2.\ddot{\phi}_2 + [I_3 + \\
 & m_3.c_3^2].\ddot{\phi}_3 = L_{31}.F_8 + L_{32}.F_9
 \end{aligned} \tag{52}$$

Nessas equações são representados as características de massa e inércia do sistema no lado esquerdo e no lado direito as forças externas e momentos que atuam no modelo simplificado.

As forças externas são geradas no plano do piso entre o pneu e a pista.

Forças Laterais em Pneus:

Assumindo-se que para pequenos ângulos o Coeficiente de Proporcionalidade “*Cornering Stiffness*” é linear, tem-se a seguinte equação geral:

$$F_j = N_j \cdot \alpha_j \quad (53)$$

com $j = 1, 2, \dots, 9$

N_j = Rigidez Torcional (*Cornering Stiffness*) combinado do eixo j .

α_j = Ângulo de deriva do eixo j .

A força lateral em cada pneu dependerá também da força vertical aplicada no eixo em consequência da distribuição de peso do conjunto de veículos.

“*Slip angle*” – Ângulo de Deriva

Para o pneu dianteiro do veículo–trator, com um ângulo de esterçamento (*steer angle*) δ , o “*slip angle*” pode ser aproximado por:

$$\alpha_1 = (v + a \cdot \omega) / V - \delta \quad (54)$$

O “*slip angle*” para o 2º e 3º eixo do veículo–trator em curvas podem ser aproximados por:

$$\alpha_2 = (v - b_1 \cdot \omega) / V \quad (55)$$

$$\alpha_3 = (v - b_2 \cdot \omega) / V \quad (56)$$

As expressões do “*slip angle*” dos eixos do semi-reboque podem ser aproximados por:

$$\alpha_4 = [v - (h + L_{11}) \cdot \omega - L_{11} \cdot \dot{\phi}_1] / V - \phi_1 \quad (57)$$

$$\alpha_5 = [v - (h + L_{12}) \cdot \omega - L_{12} \cdot \dot{\phi}_1] / V - \phi_1 \quad (58)$$

$$\alpha_6 = [v - (h + s_1 + L_{21}) \cdot \omega - s_1 \cdot \dot{\phi}_1 - L_{21} \cdot \dot{\phi}_2] / V - \phi_2 \quad (59)$$

$$\alpha_7 = [v - (h + s_1 + L_{22}) \cdot \omega - s_1 \cdot \dot{\phi}_1 - L_{22} \cdot \dot{\phi}_2] / V - \phi_2 \quad (60)$$

$$\alpha_8 = [v - (h + s_1 + h_2 + L_{31}) \cdot \omega - s_1 \cdot \dot{\phi}_1 - h_2 \cdot \dot{\phi}_2 - L_{31} \cdot \dot{\phi}_3] / V - \phi_3 \quad (61)$$

$$\alpha_9 = [v - (h + s_1 + h_2 + L_{32}) \cdot \omega - s_1 \cdot \dot{\phi}_1 - h_2 \cdot \dot{\phi}_2 - L_{32} \cdot \dot{\phi}_3] / V - \phi_3 \quad (62)$$

Substituindo-se as equações de F e α e isolando-se os termos das equações tem-se:

$$\begin{aligned} & (m_0 + m_1 + m_2 + m_3) \cdot \dot{v} + \left(\sum_{i=1}^{i=9} F_i \right) \cdot v / V - (m_1' + m_2' + m_3') \cdot \dot{\omega} + [(m_0 + m_1 + m_2 + m_3) \cdot V^2 - \\ & \sum_{i=1}^{i=9} N_i'] \cdot \omega / V - [m_1 \cdot c_1 + (m_2 + m_3) \cdot s_1] \ddot{\phi}_1 - [N_4 \cdot L_{11} + N_5 \cdot L_{12} + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9) \cdot s_1] \cdot \dot{\phi}_1 / V - \\ & (N_4 + N_5) \cdot \phi_1 - (m_2 \cdot c_2 - m_3 \cdot h_2) \ddot{\phi}_2 - [N_6 \cdot L_{21} + N_7 \cdot L_{22} + (N_8 + N_9) \cdot h_2] \cdot \dot{\phi}_2 / V - (N_6 + \\ & N_7) \cdot \phi_2 - m_3 \cdot c_3 \ddot{\phi}_3 - (N_8 \cdot L_{31} + N_9 \cdot L_{32}) \cdot \dot{\phi}_3 / V - (N_8 + N_9) \cdot \phi_3 = N_1 \cdot \delta \end{aligned} \quad (63)$$

Onde:

$$m_1' = m_1.(h + c_1)$$

$$m_2' = m_2.(h + s_1 + c_2)$$

$$m_3' = m_3.(h + s_1 + h_2 + c_3)$$

$$N_1' = -N_1.a$$

$$N_2' = N_2.b_1$$

$$N_3' = N_3.b_2$$

$$N_4' = N_4.(h + L_{11})$$

$$N_5' = N_5.(h + L_{12})$$

$$N_6' = N_6.(h + s_1 + L_{21})$$

$$N_7' = N_7.(h + s_1 + L_{22})$$

$$N_8' = N_8.(h + s_1 + h_2 + L_{31})$$

$$N_9' = N_9.(h + s_1 + h_2 + L_{32})$$

$$m_0.h.\dot{v} + [(N_1 + N_2 + N_3).h - N_1' - N_2' - N_3'].v / V + I_0.\dot{\omega} + [m_0.h.V^2 + N_1.a_2 + N_2.b_1^2 + N_3.b_2^2 - (N_1' + N_2' + N_3').h].\omega / V = N_1.(a + h).\delta$$

(64)

$$\begin{aligned}
& -[m_1.c_1 + (m_2 + m_3).s_1].\dot{v} - [N_4.L_{11} + N_5.L_{12} + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9).s_1].v/V + [I_1 + m_1'.c_1 + \\
& (m_2' + m_3').s_1].\dot{\omega} - \{[m_1.c_1 + (m_2 + m_3).s_1].V^2 - N_4'.L_{11} - N_5'.L_{12} - (N_6' + N_7' + N_8' + N_9').s_1\}.\omega/V + \\
& [I_1 + m_1'.c_1^2 + (m_2 + m_3).s_1^2].\ddot{\phi}_1 + [N_4.L_{11}^2 + N_5.L_{12}^2 + (N_6 + N_7 + N_8 + N_9).s_1^2].\dot{\phi}_1/V + \\
& (N_4.L_{11} + N_5.L_{12}).\phi_1 + (m_2.c_2 + m_3.h_2).s_1.\ddot{\phi}_2 + [N_6.L_{21} + N_7.L_{22} + (N_8 + N_9).h_2].s_1.\dot{\phi}_2/V + \\
& (N_6 + N_7).s_1.\phi_2 + m_3.c_3.s_1.\ddot{\phi}_3 + (N_8.L_{31} + N_9.L_{32}).s_1.\dot{\phi}_3/V + (N_8 + N_9).s_1.\phi_3 = 0
\end{aligned} \tag{65}$$

$$\begin{aligned}
& -(m_2.c_2 - m_3.h_2).\dot{v} - [N_6.L_{21} + N_6.L_{22} + (N_8 + N_9).h_2].v/V + (I_2 + m_2'.c_2 + m_3'.h_2).\dot{\omega} - \\
& [(m_2.c_2 + m_3.h_2).V^2 - N_6'.L_{21} - N_7'.L_{22} - (N_8' + N_9').h_2].\omega/V + (m_2.c_2 + m_3.h_2).s_1.\ddot{\phi}_1 + \\
& [N_6.L_{21} + N_7.L_{22} + (N_8 + N_9).h_2].s_1.\dot{\phi}_1/V + (I_2 + m_2'.c_2^2 + m_3'.h_2^2).\ddot{\phi}_2 + [(N_6.L_{21}^2 + \\
& N_7.L_{22}^2 + (N_8 + N_9).h_2^2)].\dot{\phi}_2/V + (N_6.L_{21} + N_7.L_{22}).\phi_2 + m_3.c_3.h_2.\ddot{\phi}_3 + (N_8.L_{31} + \\
& N_9.L_{32}).h_2.\dot{\phi}_3/V + (N_8 + N_9).h_2.\phi_3 = 0
\end{aligned} \tag{66}$$

$$\begin{aligned}
& -m_3.c_3.\dot{v} - (N_8.L_{31} + N_9.L_{32}).v/V + (I_3 + m_3'.c_3).\dot{\omega} - (m_3.c_3.V^2 - N_8'.L_{31} - N_9'.L_{32}).\omega/V + \\
& m_3.h_2.s_1.\ddot{\phi}_1 + (N_8.L_{31} + N_9.L_{32}).s_1.\dot{\phi}_1/V + m_3.c_3.h_2.\ddot{\phi}_2 + (N_8.L_{31} + N_9.L_{32}).h_2.\dot{\phi}_2/V + \\
& (I_3 + m_3'.c_3^2).\ddot{\phi}_3 + (N_8.L_{31}^2 + N_9.L_{32}^2).\dot{\phi}_3/V + (N_8.L_{31} + N_9.L_{32}).\phi_3 = 0
\end{aligned} \tag{67}$$

O Sistema de Equações pode ser representado por:

$$[A] \cdot \{y\} = [B] \cdot \{x\}$$

onde:

$$\{y\}_{5 \times 1} = \begin{Bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \\ \ddot{\phi}_3 \end{Bmatrix}$$

$$\{x\}_{9 \times 1} = \begin{Bmatrix} v \\ \omega \\ \dot{\phi}_1 \\ \phi_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \phi_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \phi_3 \\ \delta \end{Bmatrix}$$

Portanto,

$$\{y\} = [A]^{-1} \cdot [B] \cdot \{x\} = [C] \cdot \{x\}$$

onde:

$$[A]_{5 \times 5} =$$

$$\begin{bmatrix} m_0 + m_1 + m_2 + m_3 & -(m_1' + m_2' + m_3') & -[m_1.c_1 + (m_2 + m_3).s_1] & -(m_2.c_2 + m_3.h_2) & -m_3.c_3 \\ m_0.h & I_0 & 0 & 0 & 0 \\ -[m_1.c_1 + (m_2 + m_3).s_1] & I_1 + m_1'.c_1 + (m_2' + m_3').s_1 & I_1 + m_1.c_1^2 + (m_2 + m_3).s_1^2 & (m_2.c_2 + m_3.h_2).s_1 & m_3.c_3.s_1 \\ -(m_2.c_2 + m_3.h_2) & I_2 + m_2'.c_2 + m_3'.h_2 & (m_2.c_2 + m_3.h_2).s_1 & I_2 + m_2.c_2^2 + m_3.h_2^2 & m_3.c_3.h_2 \\ -m_3.c_3 & I_3 + m_3'.c_3 & m_3.c_3.s_1 & m_3.c_3.h_2 & I_3 + m_3.c_3^2 \end{bmatrix}$$

e

2.2.5.5 Simulação Dinâmica:

Para a simulação dinâmica do Sistema de Equações definido para o conjunto Rodotrem, foram considerados os dados de entrada de acordo com as especificações fornecidas pelos fabricantes dos semi-reboques constantes no Anexo I.

Os Momentos de Inércia foram calculados com auxílio de software de CAD (*Computer Aided Design*), para as diversas condições de carregamento.

Considerou-se que os veículos estão equipados com pneus Michelin XZA, cujos valores de Coeficiente de Curva (*Cornering Coefficient*) foram obtidos do livro “*Theory of Ground Vehicles*” – pag. 34 [23]. A Rigidez Torcional (*Cornering Stiffness*) de cada eixo foi obtida considerando-se a carga vertical atuando em cada pneu nas seguintes condições:

- Carregado (com carga máxima de acordo com o PBT para o conjunto);
- Vazio (com peso em ordem de marcha);
- Com o primeiro semi-reboque vazio e o segundo carregado;
- Carregado, considerando-se uma redução no comprimento do Dolly intermediário de 200 mm.

Para os casos de carregamento acima, foram simulados ainda duas condições de ângulo de esterçamento como entrada do sistema conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13:

- Esterçamento do volante em forma de degrau, com amplitude de 1°. aplicado no tempo zero;
- Esterçamento em forma senoidal de 1° de amplitude aplicado entre zero e dois segundo.

Foram plotados os resultados a uma velocidade de deslocamento longitudinal de 70 km/h e ainda comparados com os mesmos resultados a 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 km/h para cada uma das condições acima de acordo com as Figuras 44 e 45.

Os Resultados da simulação dinâmica estão apresentados no Capítulo 4.

2.3 Validação do modelo matemático

Para validação dos modelos anteriores foram introduzidos os dados do *Paper* “*Handling Characteristics of Tractor-Trailer Combinations*” de Frederick Jindra [19], cujos resultados estão reproduzidos na Figura 20 abaixo.

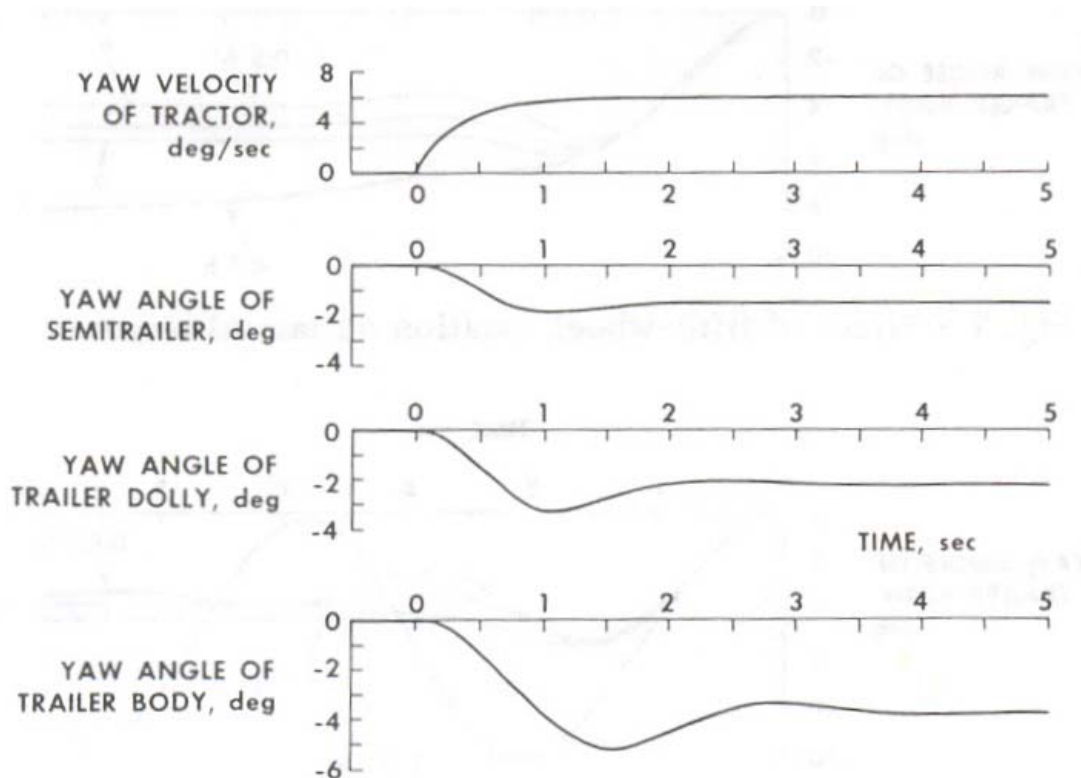


FIGURA 20: Resposta lateral para esterçamento de entrada - F. Jindra [19].

Com os mesmos dados foram obtidos os seguintes resultados através do software MatLab e Simulink de acordo com o modelo no Anexo 1, que validam o procedimento proposto:

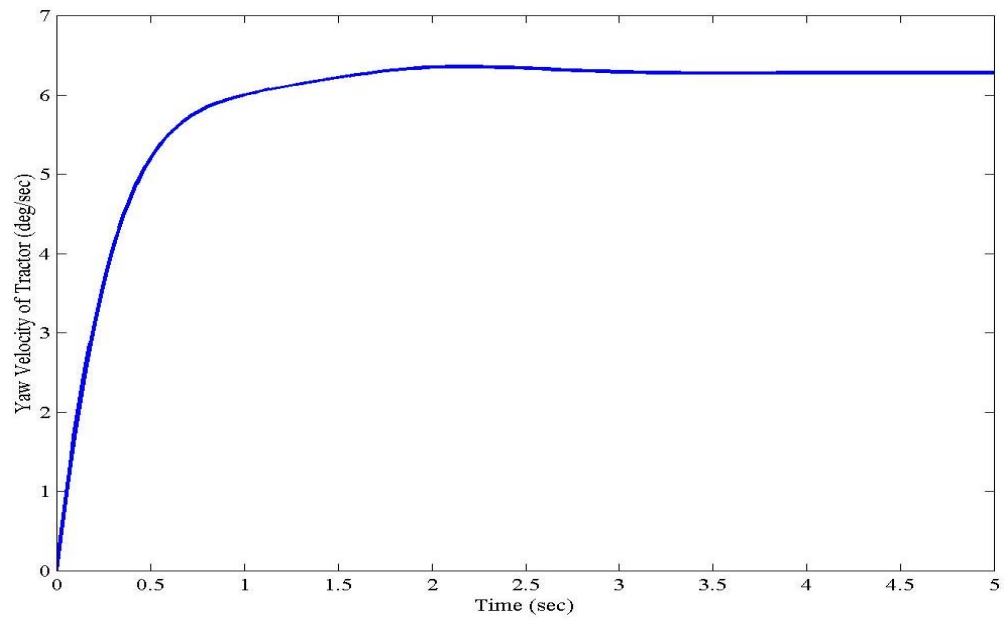


FIGURA 21: Velocidade lateral do trator (graus/segundos)

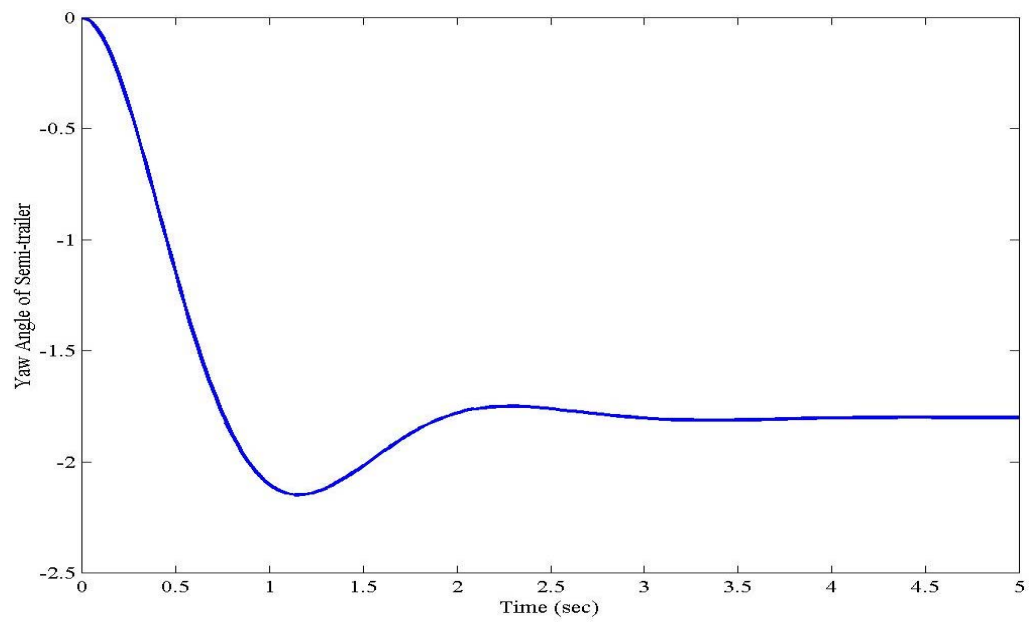


FIGURA 22: Ângulo de inclinação do semi-reboque (graus)

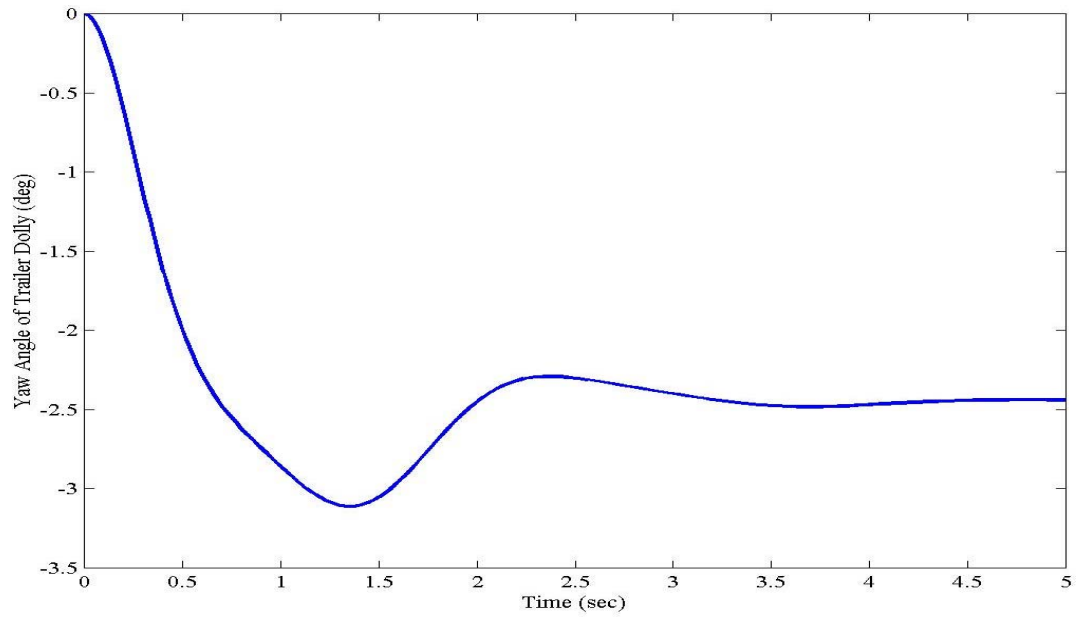


FIGURA 23: Ângulo de inclinação do reboque dolly (graus)

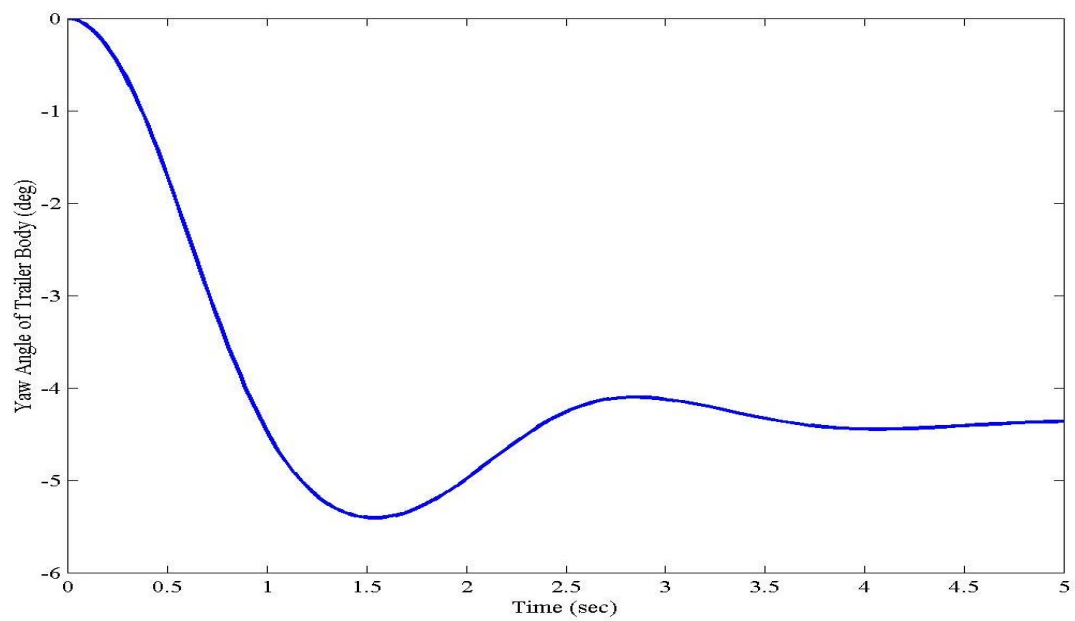


FIGURA 24: Ângulo de inclinação do reboque (graus)

3. AVALIAÇÃO DOS CVCS

3.1 Equipamentos para avaliação dos Conjuntos de Veículos

Desenvolvido em parceria pelas empresas Transtech Engenharia e Inspeção S/C de Pinhais-PR e MicroHard Tecnologia Eletrônica Ltda de Porto Alegre-RS com patrocínio da Organização da Sociedade Civil de Interesse Público – IDT – Instituto de Desenvolvimento do Transporte, em Pinhais-PR, o Sistema ***SkySafe Cargo***[®] baseia-se no mapeamento das acelerações laterais geradas por um veículo ou conjunto de veículos em um determinado percurso através de um sistema de GPS (*Global Position System*) acoplado a módulos de acelerômetros biaxiais. Um software gerenciador registra os dados instantaneamente gerando uma planilha eletrônica.

O sistema é composto basicamente por um micro-computador, um controlador de comunicação, um GPS e quatro módulos de acelerômetros.

Os dados registrados para cada um dos acelerômetros instalados são:

- Data;
- Hora;
- Velocidade real instantânea em km/h
- Longitude;
- Latitude;
- Aceleração no eixo “X”;
- Inclinação no eixo “X”;
- Aceleração no eixo “Y”;

- Inclinação no eixo “Y”;

As principais utilidades do sistema SkySafe Cargo no desenvolvimento de tecnologia para melhorar a segurança nas rodovias são:

- a) Avaliação do Performance de Conjuntos de Veículos de Carga: através da instalação de um acelerômetro em cada unidade do conjunto obtém-se o monitoramento das acelerações laterais simultâneas e com isso permite-se avaliar o fenômeno da Amplificação Traseira para esse conjunto de veículo específico.
- b) Determinação de Pontos Críticos das rodovias: através do percurso de determinada rodovia ou trecho de rodovia pode-se mapear o nível de aceleração lateral a que estarão sujeitos os veículos quando trafegando dentro da velocidade especificada em cada ponto geograficamente identificado pelo GPS. Esse banco de dados permite ao administrador da rodovia revisar suas obras e a sinalização viária ampliando as condições de segurança da via.
- c) Sistema de prevenção ao tombamento de veículos de carga: uma vez mapeado determinado trecho de rodovia, pode-se determinar qual a aceleração máxima que pode ser exposto um conjunto de veículos de carga e a sua velocidade associada para aquele trecho, independente da sinalização viária. Através de sistema SkySafe Cargo simplificado constituído de um módulo de controle com o banco de dados, um GPS e um display, pode-se monitorar em tempo real se o veículo está se aproximando de determinado ponto crítico com velocidade compatível com a aceleração lateral máxima

pré-determinada. Caso esteja acima desse limite, o display acusará antecipadamente a necessidade de reduzir a velocidade para manter-se dentro de acelerações laterais adequadas.

Diagramas dos Sistemas.

Conforme a Figura 25 o sistema SkySafe Cargo é composto por:

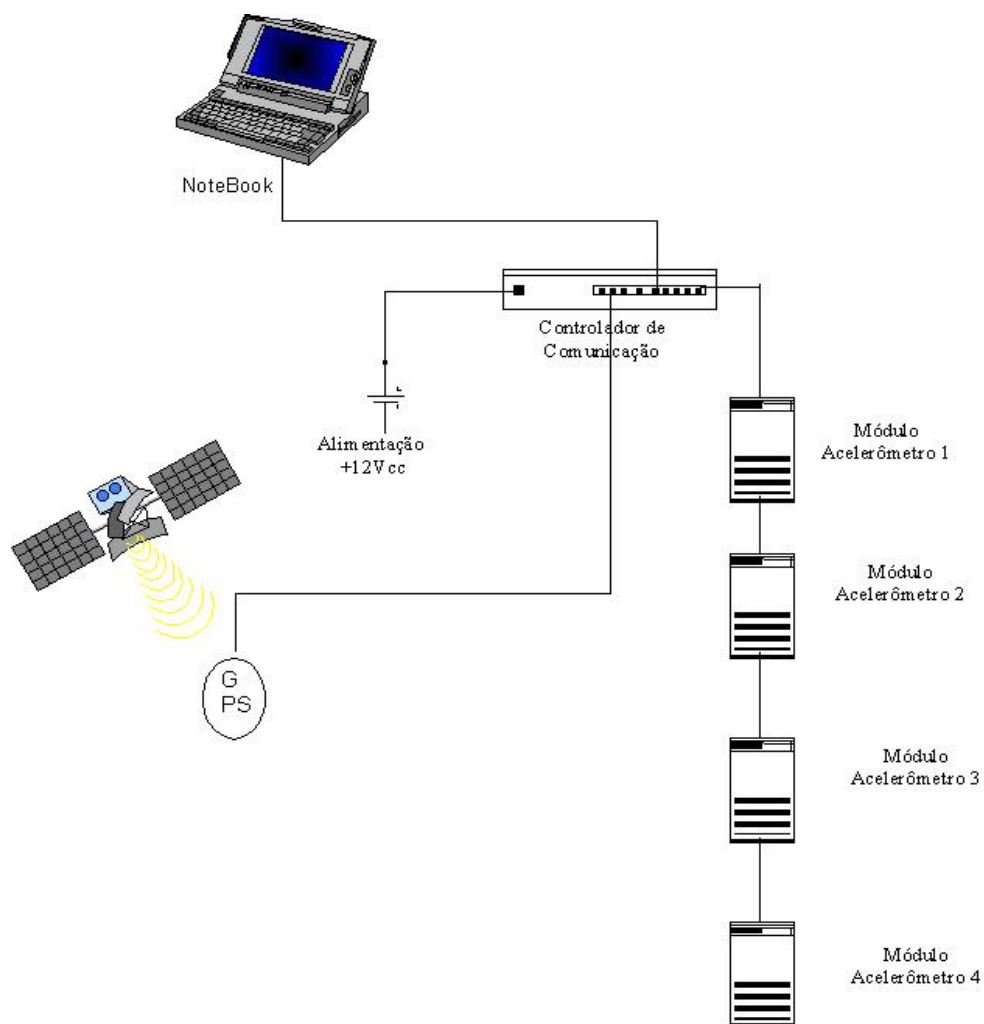


FIGURA 25 - Diagrama do Sistema SkySafe Cargo

- Um notebook;
- Controlador de Comunicação;
- Módulo GPS
- Quatro Módulos de Acelerômetros;
- Cabo de alimentação;
- Cabos de comunicação.

O Sistema SkySafe Cargo Simplificado é composto por (conforme Figura 26):

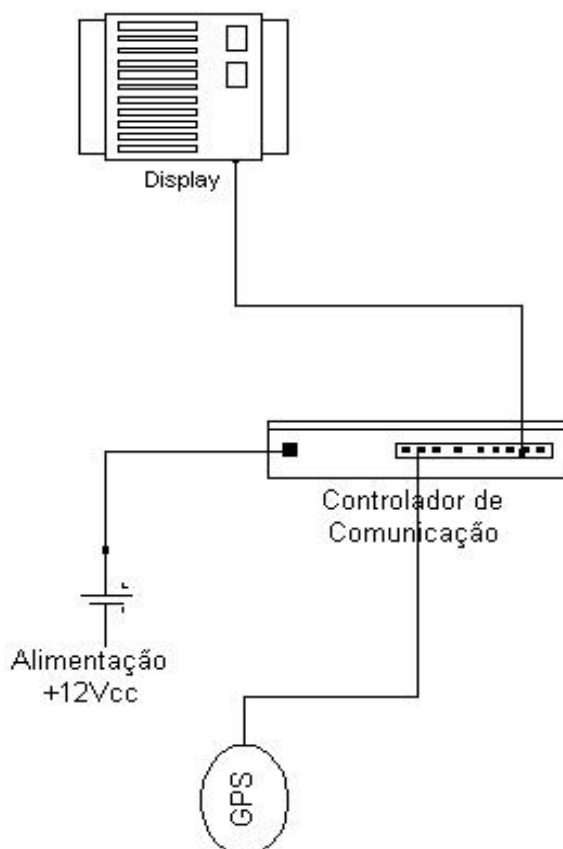


FIGURA 26 - Sistema SkySafe Cargo Simplificado

- Controlador de Comunicação;
- Módulo GPS;
- Display ;
- Cabo de alimentação;
- Cabos de comunicação.

Características do Acelerômetro:

O Módulo Acelerômetro Serial foi desenvolvido para a aquisição de dados referente a controle de estabilidade de carga, onde é extremamente importante o conhecimento dos valores de aceleração em dois eixos. Um microcontrolador permite a calibração e leitura do acelerômetro através de uma linha serial.

Características Principais do Módulo:

- Mede a aceleração na faixa de ± 2 g em ambos os eixos, X e Y.
- Mede a inclinação em graus na faixa de $\pm 90^\circ$ em ambos os eixos, X e Y.
- Duas interfaces seriais, sendo uma RS-485 e outra RS-232.

Características da comunicação:

- Interface Serial: RS-485 ou RS-232
- Protocolo: MODBUS (Implementado)
- Taxa de transmissão: 9.600 bauds

- Start Bits: 1
- Stop Bits: 1
- Tempo de resposta serial: 30 a 32 ms

Especificações Elétricas:

Taxa de aquisição acelerômetro: 76,7 Hz

Resolução (g) acelerômetro: 0,006 g

Resolução (graus de inclinação) acelerômetro: 0,36°

Tensão nominal de alimentação: 24 VCC

Faixa de alimentação: 8 VCC a 30 VCC

Corrente máxima em 24 VCC: 15 mA

Ilustração do módulo:



FIGURA 27 - Foto do Módulo do Acelerômetro

Características do Software Gerenciador:

Desenvolvido em ambiente Windows o Software do Sistema SkySafe Cargo tem a seguinte tela principal:

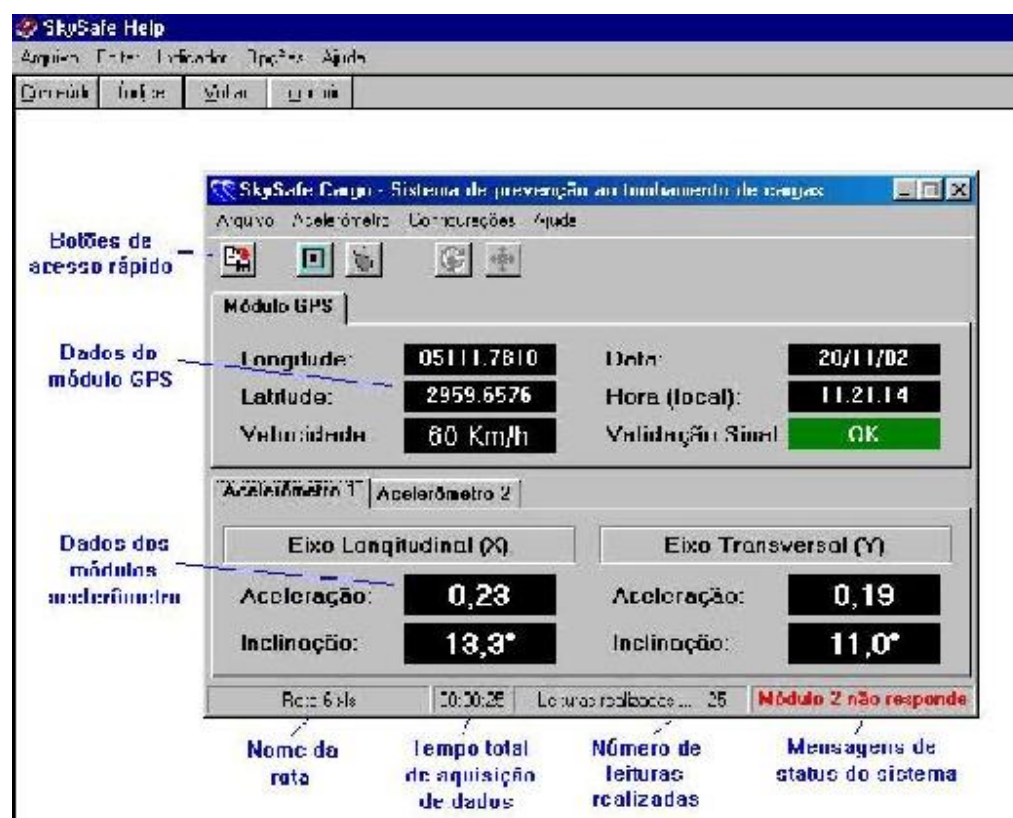


FIGURA 28 - Ilustração da tela do Software SkySafe Cargo

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultado da Análise Matemática

Com auxílio do Software MatLab e Simulink foram simulados os modelos de CVCs Bi-trem e Rodotrem de acordo com as características especificadas no Capítulo 2, para avaliação das acelerações laterais geradas em cada unidade e dessa forma quantificar o fenômeno da Amplificação Traseira nesses conjuntos, tendo sido obtidos os resultados a seguir apresentados.

4.1.1 Comparativo na condição carregado, a 70 km/h, entrada em degrau:

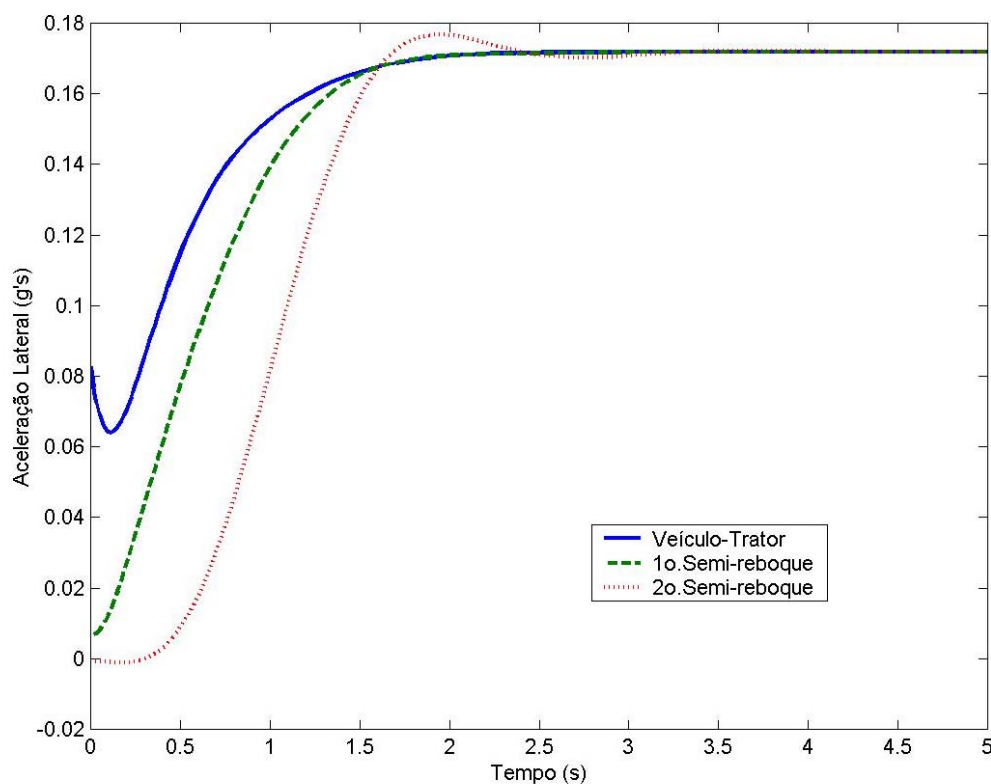


FIGURA 29 - Aceleração Lateral - Conjunto Bi-trem carregado

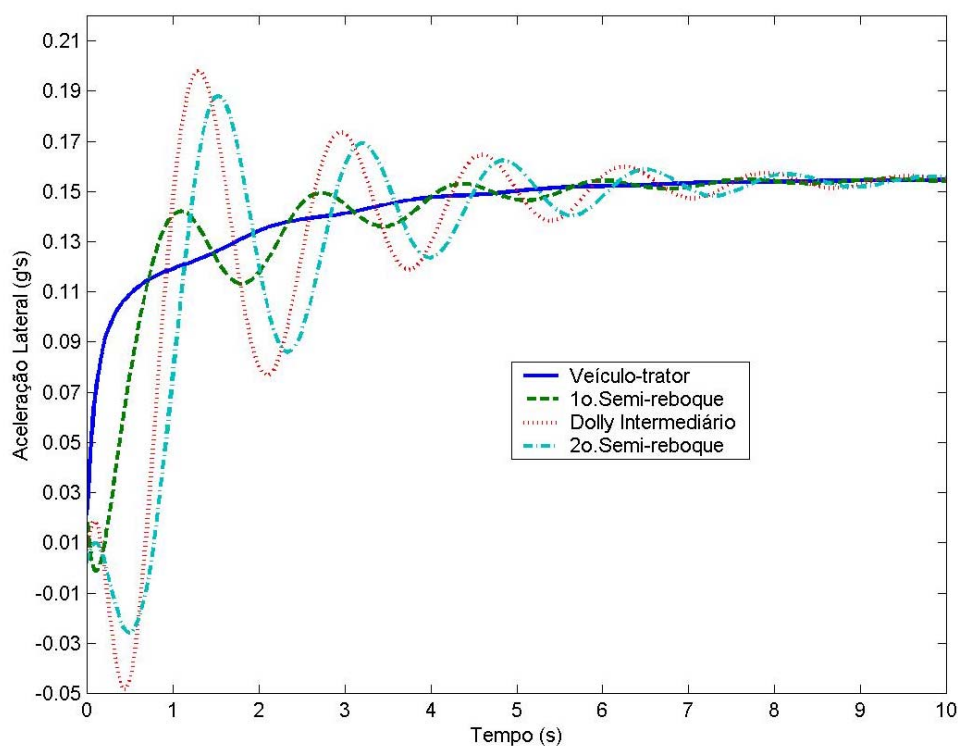


FIGURA 30 - Aceleração Lateral - Conjunto Rodotrem carregado

Conclusões:

- Para essa manobra, o conjunto bi-trem mantém-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,007 g's, comparando-se os valores máximos obtidos;
- Para essa manobra, o conjunto rodotrem mantém-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,048 g's;
- O conjunto rodotrem apresenta uma amplificação aproximadamente 7 vezes maior que o conjunto bi-trem nas mesmas condições.

4.1.2 Comparativo na condição vazio, a 70 km/h, entrada em degrau:

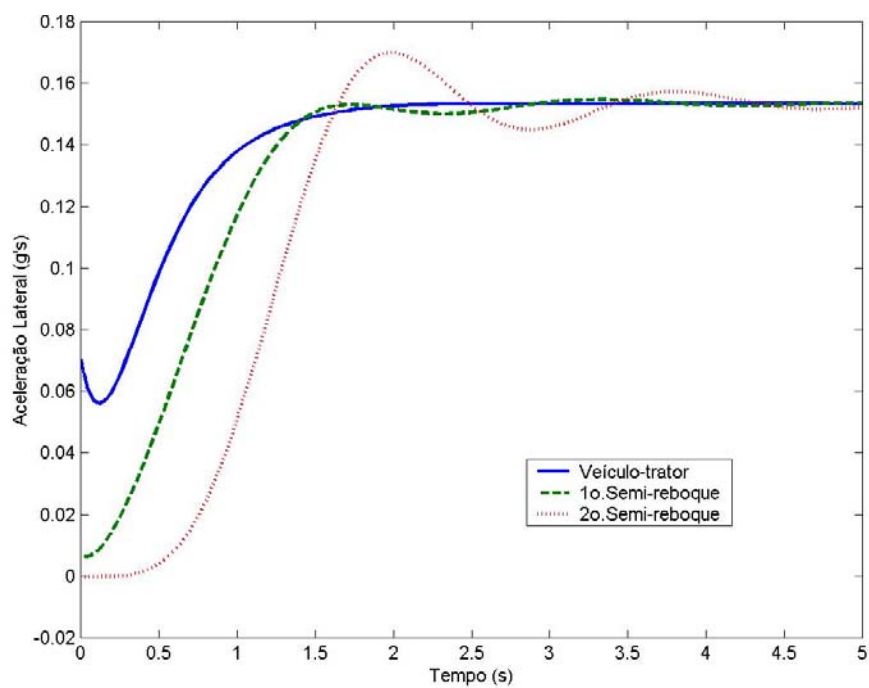


FIGURA 31 - Aceleração Lateral - Conjunto Bi-trem vazio

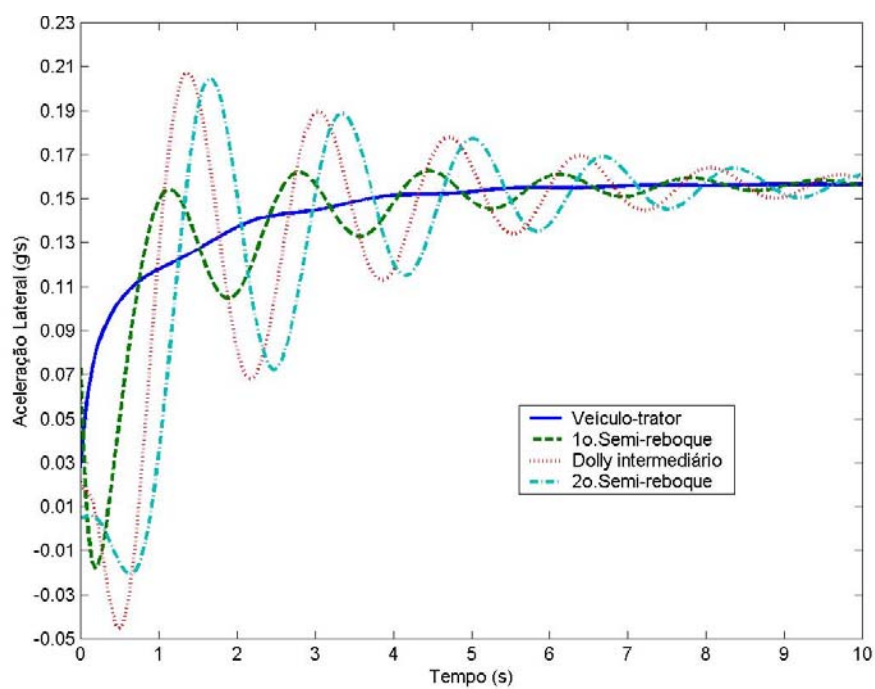


FIGURA 32 - Aceleração Lateral - Conjunto Rodotrem vazio

Conclusões:

- Para essa manobra, o conjunto bi-trem mantêm-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,017 g's;
- Para essa manobra, o conjunto rodotrem mantêm-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,055 g's;

4.1.3 Comparativo na condição 1º. semi-reboque vazio e 2º. carregado, a 70 km/h, entrada em degrau:

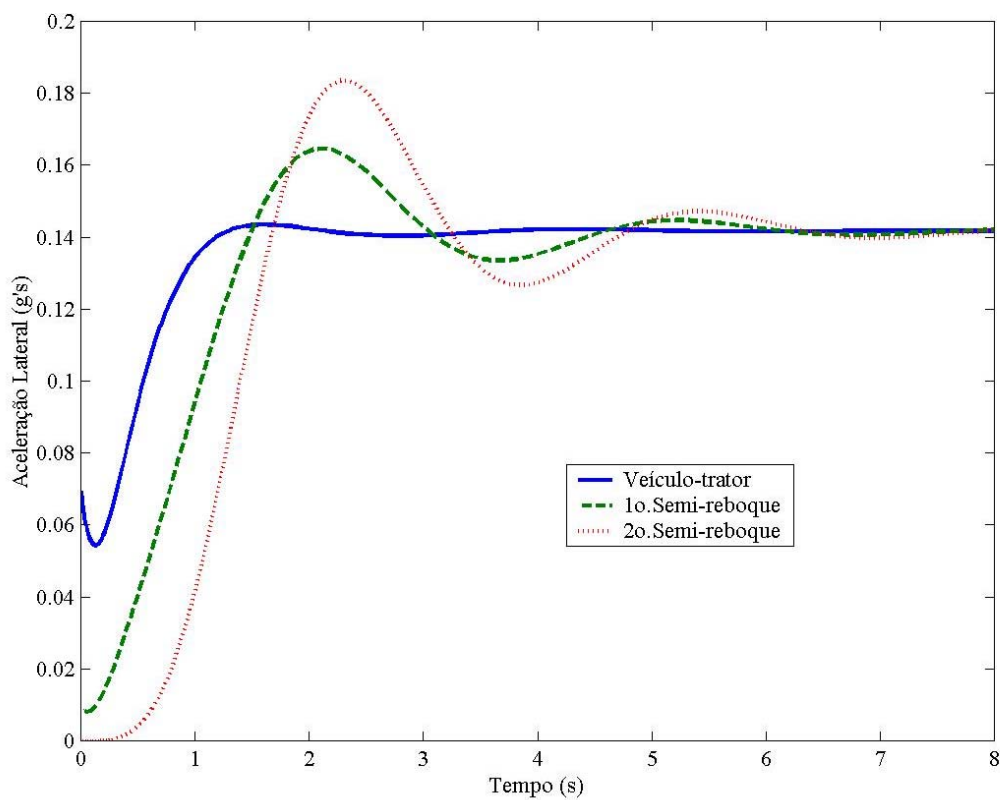


FIGURA 33 - Conjunto Bi-trem na condição 1º. semi-reboque vazio e 2º. carregado.

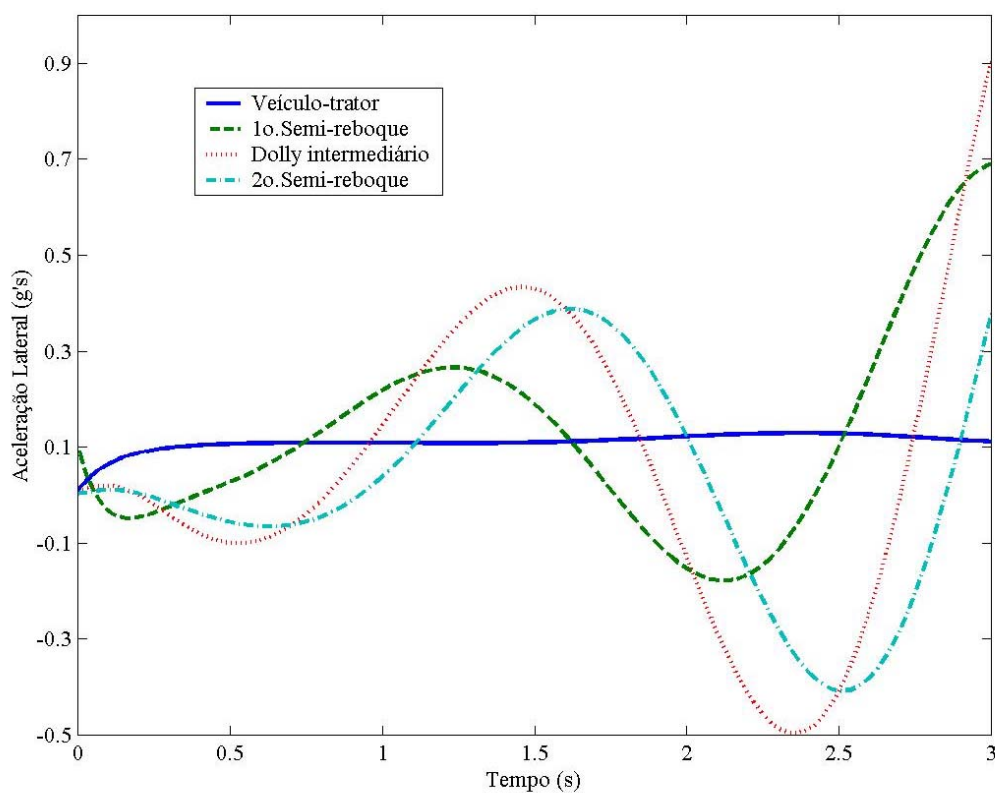


FIGURA 34 - Conjunto Rodotrem na condição 1º. semi-reboque vazio e 2º. carregado.

Conclusões:

- Para essa manobra, o conjunto bi-trem mantém-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,041 g's;
- Para essa manobra, o conjunto rodotrem torna-se instável.

4.1.4 Avaliação do conjunto Rodotrem alterando-se o comprimento do Dolly Intermediário.

Reduzindo o comprimento da lança do dolly intermediário em 200 mm são esperados os resultados abaixo.

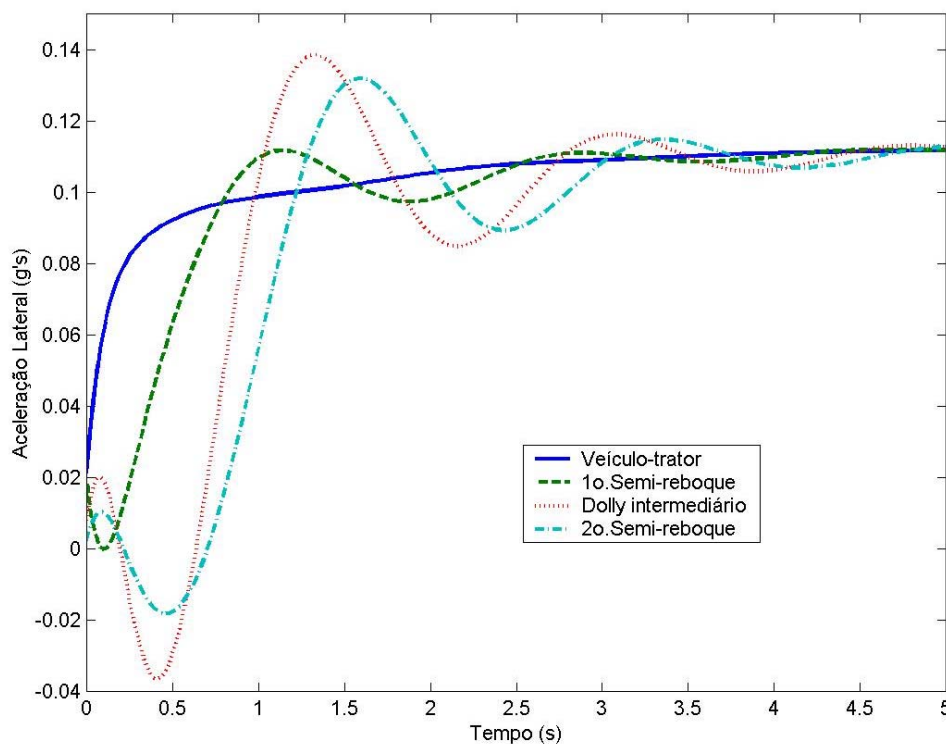


FIGURA 35 - Conjunto Rodotrem carregado reduzindo-se o comprimento do Dolly intermediário

Conclusões:

- Para essa manobra, o conjunto rodotrem mantém-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,038 g's. Em relação ao comprimento original houve uma redução na Amplificação Traseira na ordem de 50% (de 0,077 g's para 0,038 g's).

4.1.5 Comparativo na condição carregado, a 70 km/h, entrada senoidal:

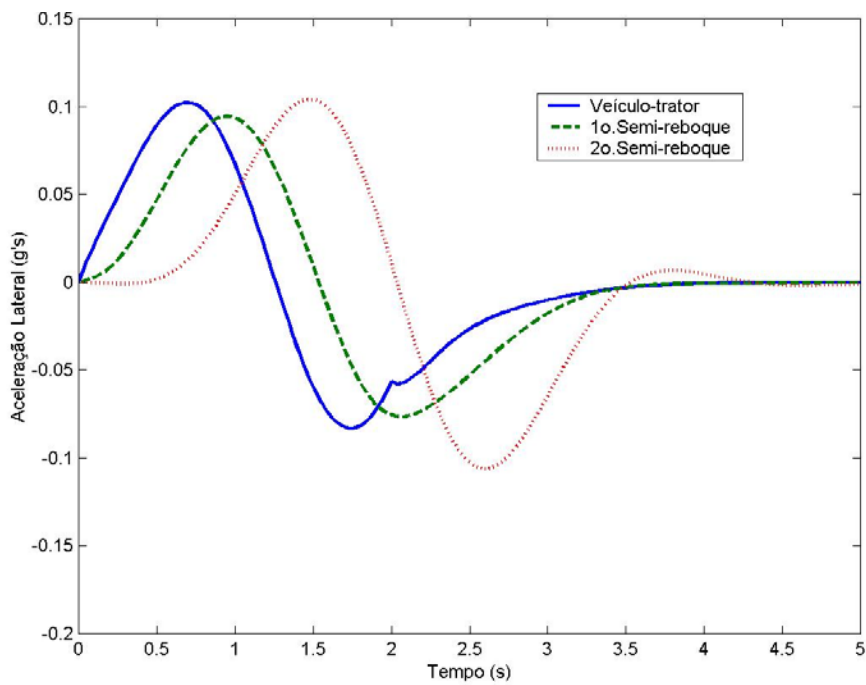


FIGURA 36 - Aceleração Lateral - Conjunto Bi-trem carregado. Senoidal

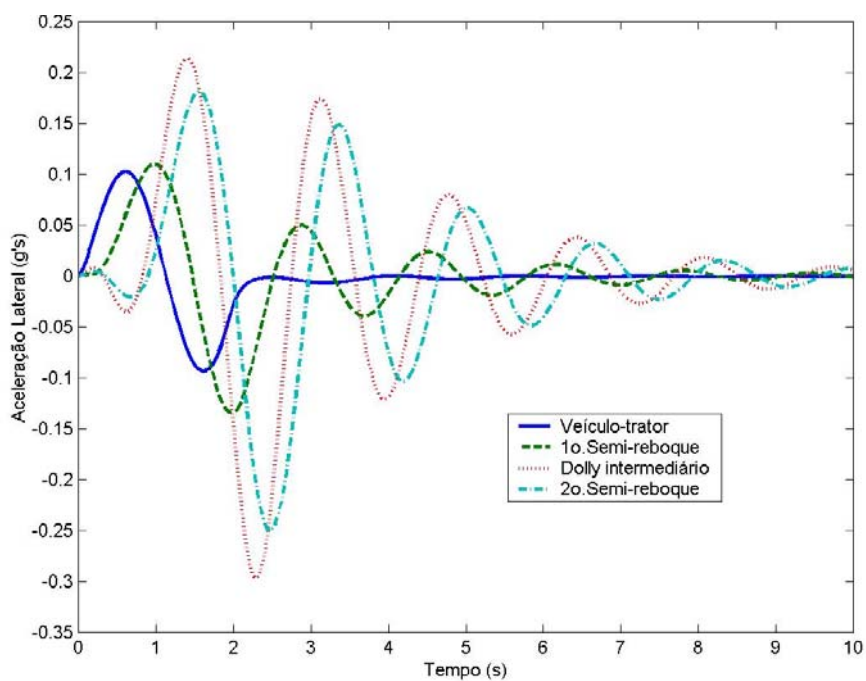


FIGURA 37 - Aceleração Lateral - Conjunto Rodotrem carregado. Senoidal

Conclusões:

- Para essa manobra, o conjunto bi-trem mantêm-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,025 g's;
- Para essa manobra, o conjunto rodotrem amplifica a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,204 g's. Considerando que alguns modelos de veículos, como por exemplo semi-reboques tanques, tem seu Limiar de Tombamento Lateral Estático – SRT próximo a 0,30 g's, pode ocorrer o tombamento desse conjunto com essa manobra.

4.1.6 Comparativo na condição vazio, a 70 km/h, entrada senoidal:

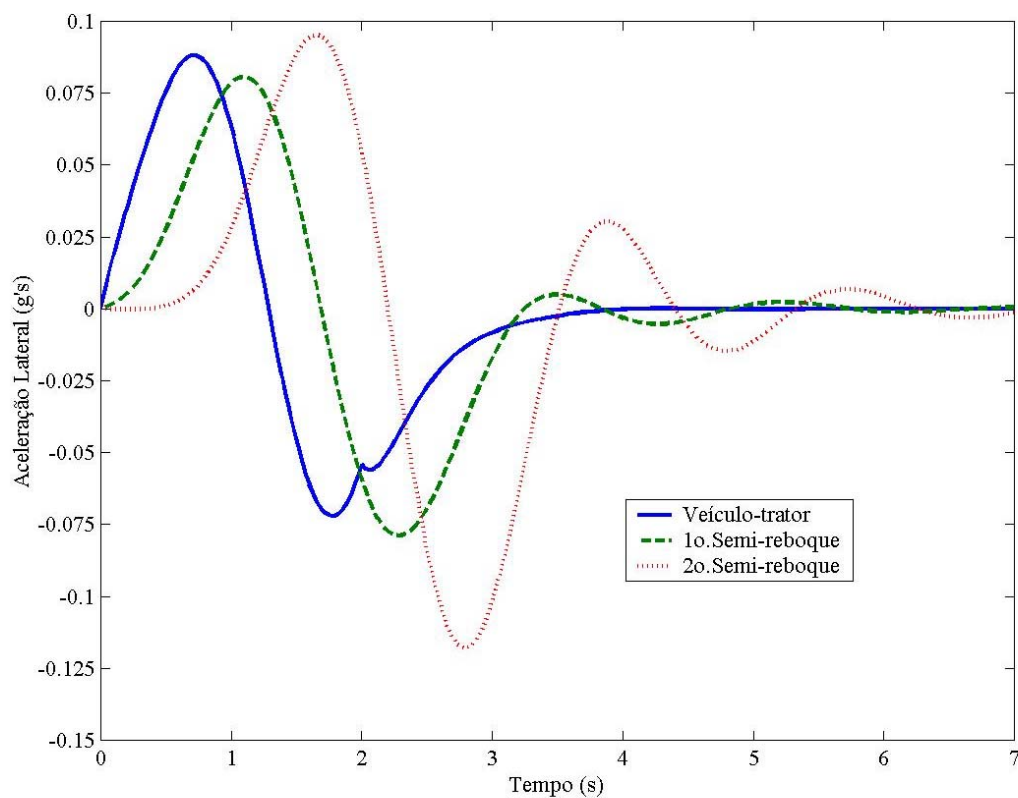


FIGURA 38 - Aceleração Lateral - Conjunto Bi-trem vazio. Senoidal

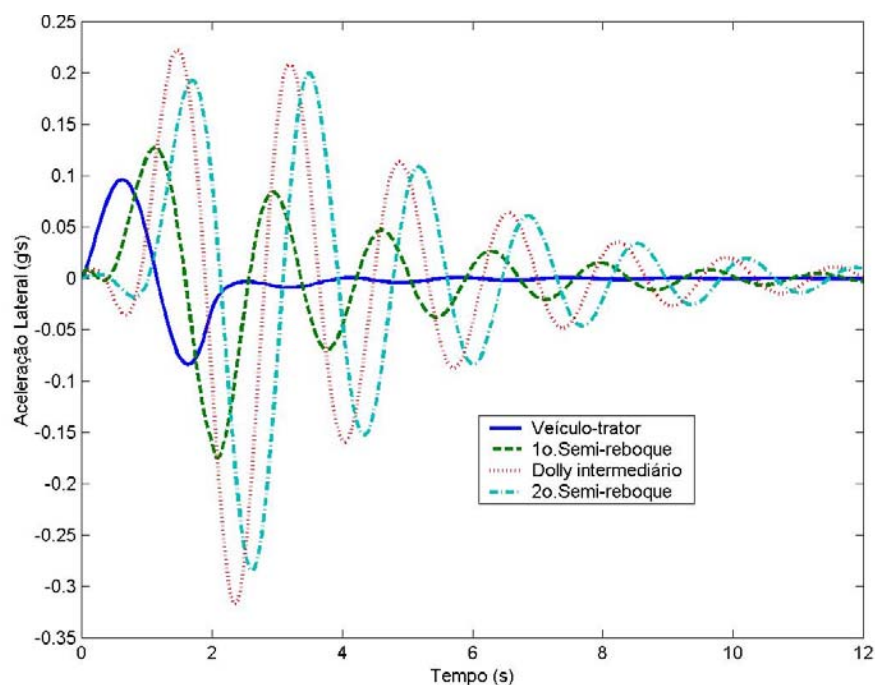


FIGURA 39 - Aceleração Lateral - Conjunto Rodotrem vazio. Senoidal

Conclusões:

- Para essa manobra, o conjunto bi-trem mantém-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,044 g's;
- Para essa manobra, o conjunto rodotrem amplifica a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,235 g's. Considerando que alguns modelos de veículos, como por exemplo semi-reboques tanques, tem seu Limiar de Tombamento Lateral Estático – SRT próximo a 0,30 g's, pode ocorrer o tombamento desse conjunto com essa manobra.

4.1.7 Comparativo na condição 1°. Semi-reboque vazio e 2°. carregado, a 70 km/h, entrada senoidal:

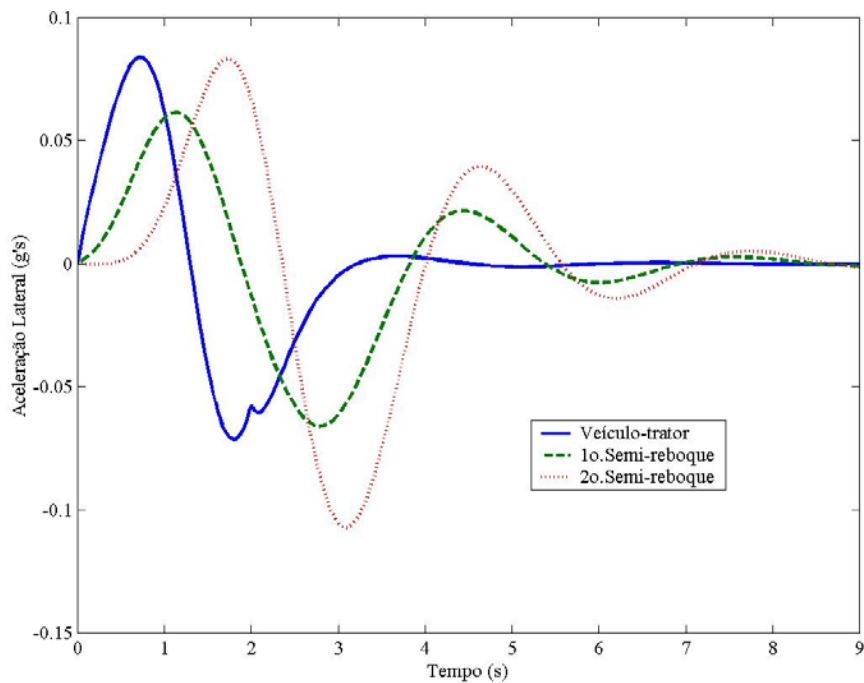


FIGURA 40 - Aceleração Lateral - Conjunto Bi-trem, 1°. Semi-reboque vazio e 2°. carregado.

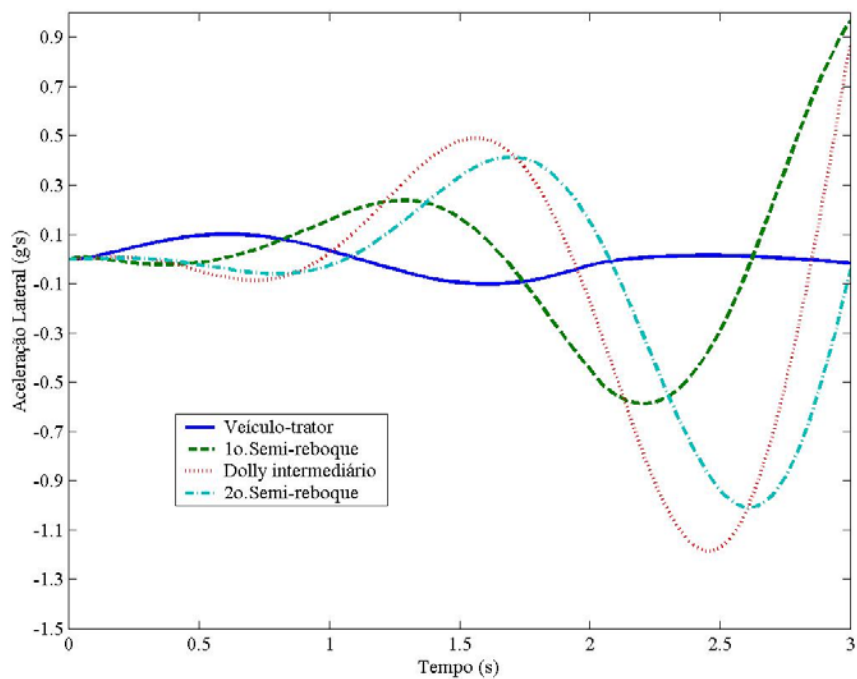


FIGURA 41 - Aceleração Lateral - Conjunto Rodotrem, 1°. Semi-reboque vazio e 2°. carregado

Conclusões:

- Para essa manobra, o conjunto bi-trem mantém-se estável amplificando a aceleração lateral em relação à do veículo-trator em 0,036 g's;
- Para essa manobra, o conjunto rodotrem torna-se instável.

4.1.8 Comparativo entre Bi-trem e Rodotrem em velocidades de 20 a 90 km/h

Para avaliação do risco de tombamento foram plotadas as acelerações laterais máximas, em valores absolutos, encontradas em cada uma das unidades dos conjuntos, na condição carregado considerando as duas variações de entrada, para as velocidades de 20 a 90 km/h. Os resultados estão nos gráficos a seguir.

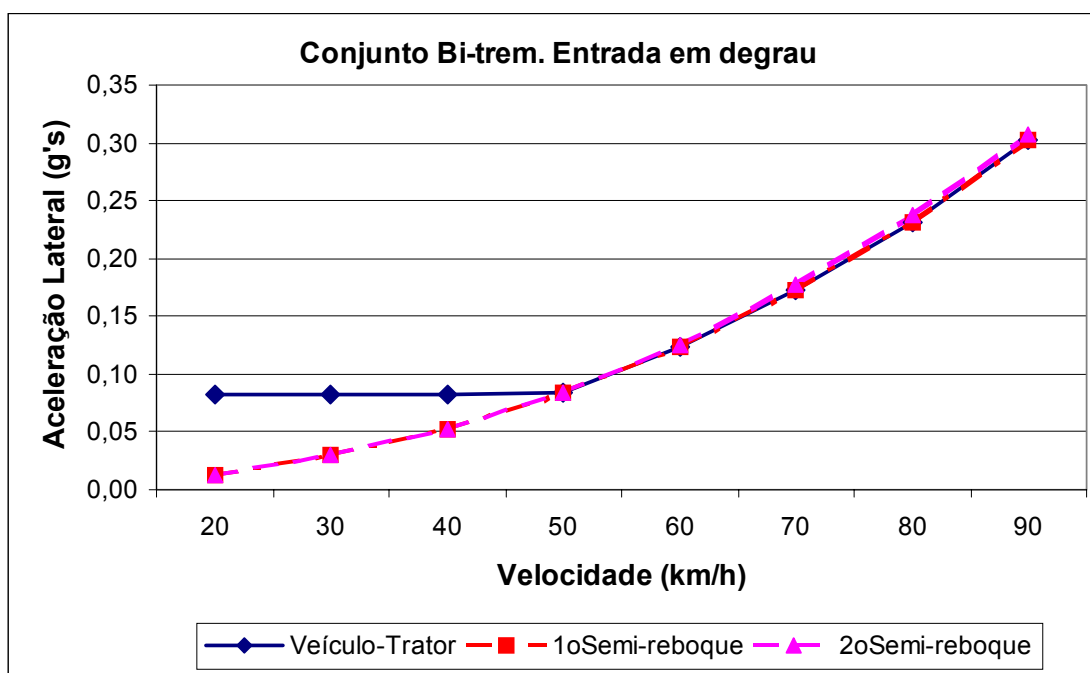


FIGURA 42 – Comparativo Bi-trem – Entrada em degrau – Velocidades de 20 a 90 km/h

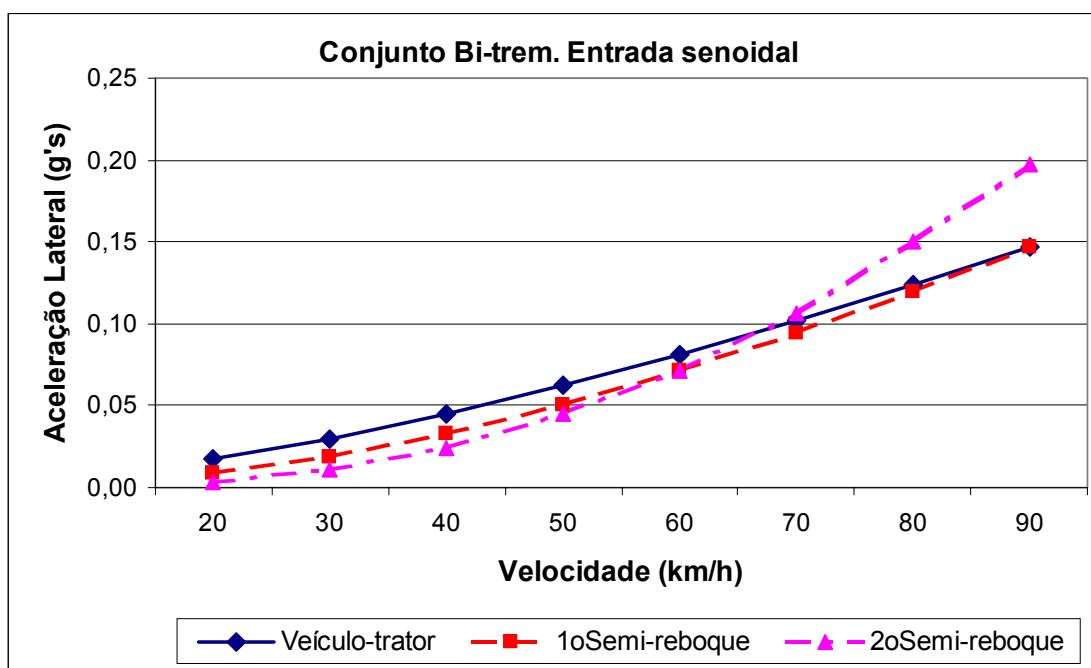


FIGURA 43 – Comparativo Bi-trem – Entrada Senoidal – Velocidades de 20 a 90 km/h

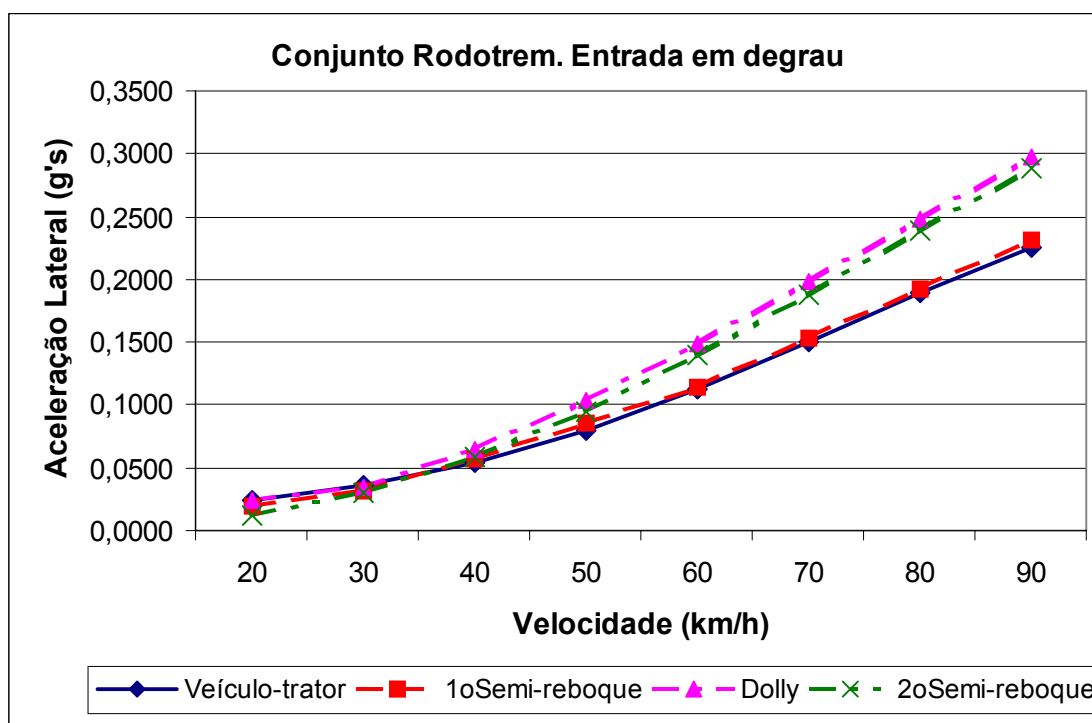


FIGURA 44 – Comparativo Rodotrem – Entrada em degrau – Velocidades de 20 a 90 km/h

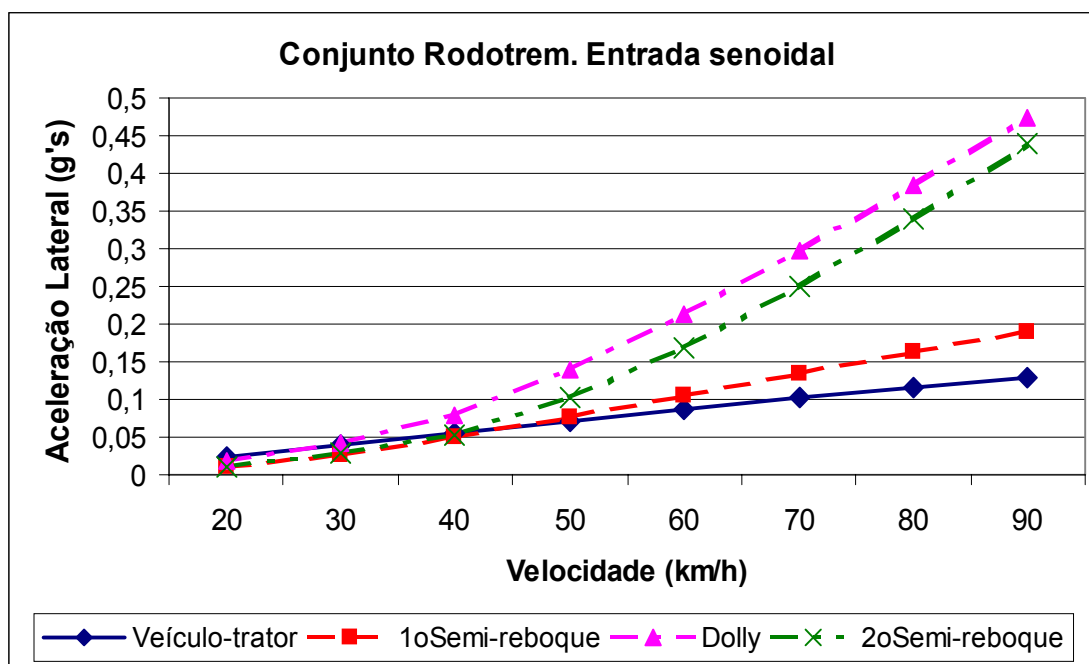


FIGURA 45 – Comparativo Rodotrem – Entrada Senoidal – Velocidades de 20 a 90 km/h

4.1.9 A questão da instabilidade do conjunto Rodotrem

A instabilidade do conjunto do tipo Rodotrem sob condições específicas de carregamento e velocidade, mostrada nos itens 4.13 e 4.1.7, pode ser também observada através da análise dos autovalores do sistema. Nota-se na Tabela 2 (1ª. coluna), que a parte real de um autovalor apresenta resultado positivo, de modo que as soluções para o sistema de equações diferenciais nessas condições são oscilações crescentes [26].

Para a mesma condição de carregamento foram avaliados os resultados do conjunto nas seguintes hipóteses: a velocidade de 20 km/h (2ª. coluna) e outra com uma alteração de projeto hipotética através da redução do comprimento do Dolly intermediário em 400 mm, a velocidade de 70 km/h (3ª. coluna). Em ambos os casos as partes reais dos autovalores do sistema passam ter valores negativos, indicando que, nessas condições, o sistema é estável.

Foi ainda avaliado, para efeito comparativo, o conjunto na condição de carregamento normal (ambos os semi-reboques com carga), a uma velocidade de 70 km/h (4ª. coluna). Para o sistema Rodotrem original notou-se que o sistema instabiliza-se para velocidade em torno de 128 km/h (5ª. coluna). Todos os autovalores estão representados na Tabela 2.

TABELA 2 – Autovalores do Sistema para o Rodotrem

1º vazio, 2º com carga a 70 km/h	1º vazio, 2º com carga a 20 km/h	1º vazio, 2º com carga a 70 km/h, reduzindo o Dolly em 400 mm	1º e 2º com carga, a 70 km/h	1º e 2º com carga, a 128 km/h
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
-5.4740 + 7.2821i	-0.0276 + 1.9038i	-6.0447 + 8.5843i	-4.8739 + 6.3358i	-10.8741
-5.4740 - 7.2821i	-0.0276 - 1.9038i	-6.0447 - 8.5843i	-4.8739 - 6.3358i	-2.8007 + 6.6617i
0.7260 + 3.5057i	-17.5295 + 4.5306i	-0.3113 + 3.4066i	-9.5823	-2.8007 - 6.6617i
0.7260 - 3.5057i	-17.5295 - 4.5306i	-0.3113 - 3.4066i	-0.4509 + 3.8072i	0.0037 + 4.1633i
-2.4859 + 1.5423i	-0.3646	-1.9869 + 2.2346i	-0.4509 - 3.8072i	0.0037 - 4.1633i
-2.4859 - 1.5423i	-2.1988	-1.9869 - 2.2346i	-2.4181 + 2.4541i	-1.4192 + 3.1940i
-8.7205	-14.6687	-8.6944	-2.4181 - 2.4541i	-1.4192 - 3.1940i
-0.1949	-12.9468	-0.2241	-0.5073	-0.1371

4.2 Avaliação de um CVC com o equipamento SkySafe Cargo

Foi monitorado um conjunto do tipo Bi-trem de propriedade da empresa TIC Transportes Ltda, em 24 de abril de 2004, na Cidade Industrial de Curitiba constituídos pelos seguintes veículos (Fotos do Conjunto – Figuras 46, 47, 48 e 49):

- Veículo-Trator marca Volvo FH12 380 6x2;
- 1º. e 2º. Semi-reboques tanque, 2 eixos, marca Randon;
- Condição: Carregado – Produto químico. Peso Bruto Total: 57 toneladas.



FIGURA 46 – Conjunto do Tipo Bi-trem ensaiado em 24 de abril de 2004



FIGURA 47 – Detalhe do Acelerômetro 1 no Veículo-trator.



FIGURA 48 – Detalhe do Acelerômetro 2 no 2º. Semi-reboque.



FIGURA 49 – Detalhe do Notebook na cabine, para armazenagem dos dados.

4.2.1 Resultados obtidos

As manobras foram realizadas em um circuito fechado com curvas à direita e algumas manobras evasivas aleatórias, de maneira a comparar o desempenho do veículo-trator com o segundo semi-reboque, na questão da amplificação da aceleração lateral. Os resultados foram salvos em trechos (Rotas) para evitar sobrecarga de dados no Notebook. O monitoramento apresentou os resultados abaixo gerados a partir dos dados registrados na planilhas transcritas integralmente no Anexo 3 (colunas Aceleração Eixo X - Acelerômetros 1 e 2, veículo-trator e segundo semi-reboque respectivamente).

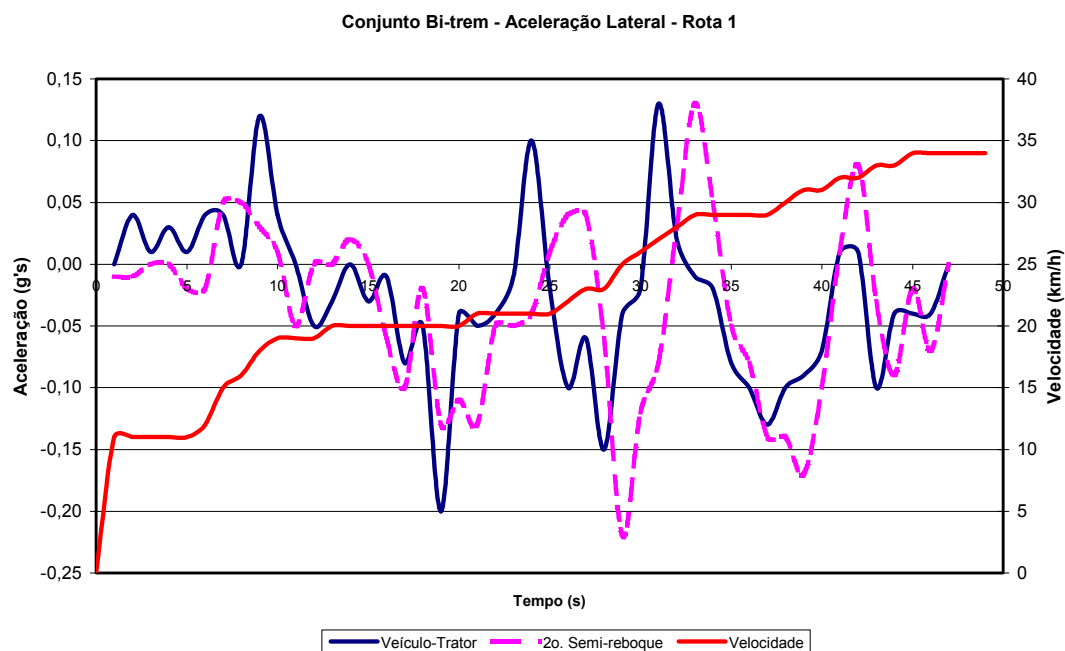


FIGURA 50 – Gráfico de Acelerações laterais – Rota 1.

Na Rota 1, o segundo semi-reboque apresentou uma amplificação máxima da aceleração lateral 0,07 g's (0,15 g's no veículo-trator e 0,22 g's no segundo semi-reboque).

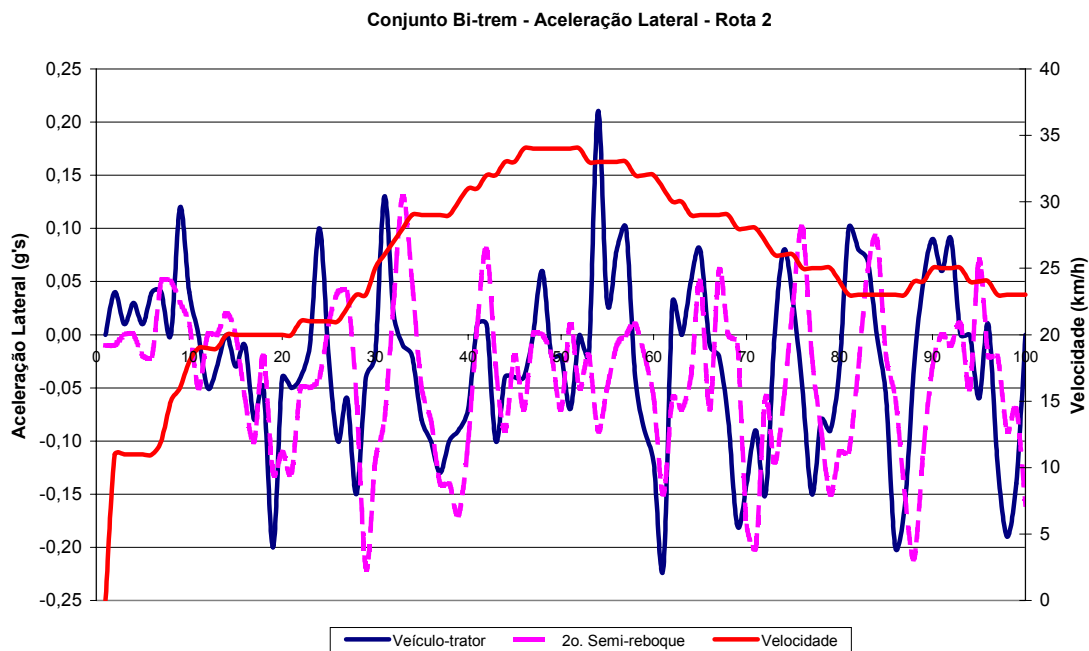


FIGURA 51 – Gráfico de Acelerações laterais – Rota 2.

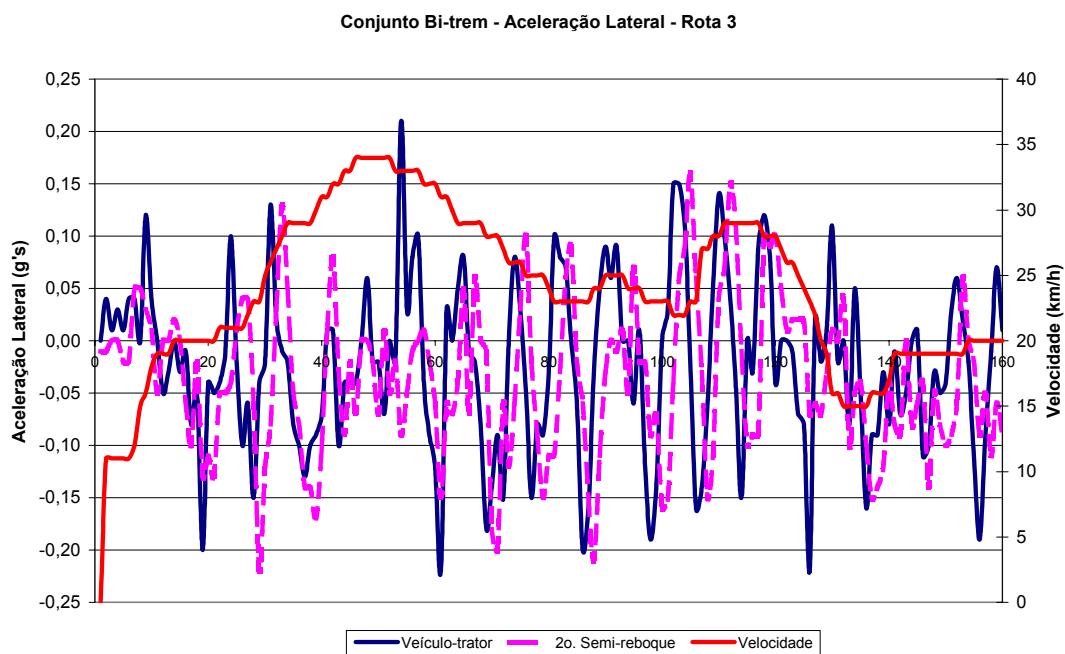


FIGURA 52 – Gráfico de Acelerações laterais – Rota 3.

Nas Rotas 3 e 4 representadas nos Gráficos das Figuras 49 e 50 respectivamente, são encontradas diferenças pequenas entre as acelerações laterais dos dois veículos.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

- a) De modo geral, o conjunto do tipo Bi-trem mantém-se relativamente estável nas manobras avaliadas, com uma amplificação lateral pequena comparada com a apresentada pelo tipo Rodotrem;
- b) Na condição sem carga, embora as acelerações laterais e o tempo de estabilização sejam maiores, comparativamente com a condição carregado, os riscos de tombamento lateral são menores tendo em vista que a inexistência da carga reduz a altura do centro de gravidade dos veículos e por consequência aumenta seu Limiar de Tombamento Lateral Estático – SRT.
- c) Na condição com o 1º Semi-reboque vazio e 2º carregado, as acelerações laterais são significativamente maiores em ambos os conjuntos, sendo que o Rodotrem torna-se instável nas manobras avaliadas, levando ao tombamento lateral.
- d) O conjunto Rodotrem, sob determinadas condições de carregamento e velocidade, pode apresentar características de instabilidade, com oscilações crescentes durante as manobras.
- e) De um modo geral, observa-se que a manobra do tipo senoidal impõe a ambos os conjuntos amplificações traseiras mais elevadas que a manobra do tipo degrau. Especificamente o conjunto Rodotrem alcança valores de acelerações laterais próximos a 0,30 g's podendo ocorrer o tombamento lateral.

- f) No comparativo com velocidades variando de 20 a 90 km/h observou-se, na entrada senoidal, que no Bi-trem as unidades traseiras passam a ter acelerações laterais maiores a partir de 70 km/h enquanto no Rodotrem a partir de 40 km/h.
- g) Na avaliação de um bi-trem com o equipamento SkySafe Cargo observou-se amplificação lateral de 0,07 g's da última unidade em relação ao veículo-trator e defasagem no tempo entre os valores de pico das unidades. Chegou-se a um máximo de 0,23 g's na última unidade em manobra do tipo senoidal
- h) A avaliação do bi-trem apresenta as dificuldades e restrições abaixo listadas:
 - os veículos são convencionais e não são preparados com nenhum sistema anti-tombamento lateral, o que torna as manobras em velocidades mais elevadas perigosas quanto a possibilidade de tombamento;
 - o sistema de aquisição de dados é limitado pela capacidade de processamento do computador o que possibilita eventual falta de registro de pontos relevantes;
 - a manobra do motorista não pode ser mapeada com precisão pelo equipamento.
- i) Devido a maior instabilidade do conjunto do tipo Rodotrem é recomendável uma redução de sua velocidade máxima permitida para 60 km/h. Alterações no projeto como a redução do comprimento da lança de engate entre o “dolly” e o segundo semi-reboque no Rodotrem, influenciam significativamente o resultado da amplificação traseira;

- j) Devido ao fenômeno da amplificação traseira do movimento é recomendável que os motoristas desses conjuntos recebam treinamento específico para evitar as manobras que tornam esse fenômeno significativo. Assim como as transportadoras devem ser orientadas de modo a não utilizar os conjuntos com carga somente na última unidade.
- k) Pelo mesmo motivo é recomendável que as autoridades de trânsito ou concessionárias de rodovias analisem os projetos das vias existentes e as normas de construções das novas identificando os pontos críticos para os CVCs afim de sinalizá-los adequadamente reduzindo a possibilidade de acidentes.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

- a) Execução de ensaios em mesa de teste de tombamento (*tilt-table experiment*) para a verificação exata do Limiar de Tombamento Lateral Estático dos diversos tipos de veículos de carga e assim identificar aqueles críticos para utilização como CVC;
- b) Aprimoramento do modelo matemático através da inclusão da transferência de carga lateral e longitudinal nessas manobras bem como do momento causado pela existência de pneus duplos nos eixos dos veículos;
- c) Preparação de veículos com sistema de proteção ao tombamento para que os ensaios dinâmicos possam ser executados em velocidades maiores.
- d) Aprimoramento do sistema de aquisição de dados através do aumento de sua capacidade de processamento para melhorar a qualidade do resultado final e pela

inclusão de potenciômetro no sistema de direção de modo a possibilitar a reprodução das mesmas condições de entrada entre o modelo matemático e a simulação dinâmica.

e) Realização de um estudo mais aprofundado do modelo Rodotrem, através de um monitoramento completo de suas unidades através da instalação de um acelerômetro em cada unidade do conjunto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SETCERGS. *O Transporte Rodoviário de Cargas em Dados no Brasil*. Disponível em <www.setcergs.com.br/trc/brasilTRC.htm> Acesso em 20 de dezembro de 2003.
- [2] SETCERGS. *Modal Rodoviário, sua Evolução e Tendências*. Revista Transnotícias, Edição No. 154 de junho/2000. Disponível em <www.abti.com.br> Acesso em 20 de dezembro de 2003.
- [3] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. *Resolução No. 12 de 06 de fevereiro de 1998*. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Publicado no Diário Oficial da União de 12 de fevereiro de 1998, Seção 1, páginas 88 e 89.
- [4] LEE, SHU HAN. *Projeto Geométrico de Estradas*. Apostila da Disciplina ECV 5115. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000. Disponível em <http://petec.ecv.ufsc.br/download/Estradas.pdf> > Acesso em Outubro de 2003.
- [5] BRASIL. *LEI Nº 9.503, de 23 de setembro de 1997*. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Sugestões Literárias, 1997.
- [6] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. *Resolução No. 68 de 23 de setembro de 1998*. Estabelece os requisitos necessários para à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC. Publicado no Diário Oficial da União de 25 de setembro de 1998, Seção 1, páginas 20 e 21.
- [7] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. *Anexo I da Resolução No. 68 de 23 de setembro de 1998*. Publicado no Diário Oficial da União de 28 de setembro de 1998, Seção 1, página 28.
- [8] CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. *Resolução No. 631/84*. Estabelece os requisitos segurança à circulação de combinações de veículos. Publicado no Diário Oficial da União de 01 de junho de 1984.
- [9] REIS, NEUTO GONÇALVES. *Viabilidade de Operação do Duplo Semi-reboque de Cinco Eixos no Brasil*. 1996. 323 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – USP de São Carlos.
- [10] SAMUEL, PETER ET AL. *Toll Truckways: A new path toward safer and more efficient freight transportation*. Junho de 2002 Disponível em <www.rppi.org/ps294.pdf> Acesso em Outubro de 2003.
- [11] GILLESPIE T. *Heavy Commercial Vehicles*. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <rubem@transtech.com.br> em 28 de agosto de 2003.
- [12] WINKLER, CHRIS. *Rollover of Heavy Commercial Vehicles*. University of Michigan – UMTRI, 2000, VOL 31, No.4.

- [13] MUELLER T.H., ET AL. *Heavy Vehicles Stability Versus Crash Rates*. Transporte Engineering Reseach New Zealand Limited. 1999. Disponível em <www.ltsa.govt.nz/publication/docs/stability.pdf> Acesso em Outubro de 2003.
- [14] SAMPSON, DAVID JOHN MATTHEW. *Active Roll Control of Articulated Heavy Vehicles*. 2000. 78 f. Dissertação (Doutorado) – Cambridge University Engineering Departament.
- [15] CARRETA TOMBA COM 41 T DE PINCHE. *Jornal A Tribuna*. Rio Branco, 25 de maio de 2002. Disponível em <www.jornalatribuna.com.br/w111.html> Acesso em 19 de dezembro de 2003.
- [16] CARRETA TOMBA, EXPLODE E MOTORISTA MORRE QUEIMADO. *Jornal O Globo*. Rio de Janeiro, 12 de março de 2003, p. 14.
- [17] DUGOFF, H.; MURPHY, R. W. *The Dynamic Performance of Articulated Highway Vehicles – A Review of the State-of-the-Art*. SAE paper 710223. 1971.
- [18] ESMAILZADEH, E. *Direcional Performance and Yaw Stabilitu of Articulated Combination Trucks*. SAE paper 962154. 1996.
- [19] JINDRA, FREDERICK. *Handling Characteristics of Tractor-Trailer Combinations*. SAE paper 650720. 1966.
- [20] KRAUTER, A. I. ; WILSON, R. K. *Simulation of Tractor-Semi-trailer Handling*. SAE paper 710922. 1972.
- [21] MIKULCIK, E. C. *The Dynamics of Tractor-Trailer Vehicles: the Jackknifing Problem*. SAE paper 710045. 1971.
- [22] MAC ADAM, CHARLES C. *A computer-Based Study of the Yaw/Roll Stability of Heavy Trucks Characterized by High Center of Gravity*. SAE 821260. 1982.
- [23] WONG, J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. Ottawa-Canada: Wiley-Interscience Publication, 1993
- [24] GILLESPIE, THOMAS D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*; Warrendale-USA: Society Automotive Engineers.1992.
- [25] ELLIS, J.R. *Vehicle Handling Dynamics*; Londres-Inglaterra: Mechanical Engineering Publications Limited, 1994.
- [26] BOYCE, E. WILLIAM; DIPRIMA, RICHARD C. *Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno*. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1994.

GLOSSÁRIO

AASHTO	American Association Of State Highway & Transportation Officials
ATA Foundation	American Trucking Association
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CVC	Conjunto de Veículos de Carga
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DOT	US – Departament Of Transportation
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
GPS	Global Position System
IRU	International Road Transport Union
OSCIP	Organização da Sociedade Civil de Interesse Público
PBT	Peso Bruto Total
PIB	Produto Interno Bruto
SETCERGS	Sindicado das Empresas Transportadoras de Cargas do Rio Grande do Sul
SRT	Static Rollover Thresold

ANEXO 1

Modelos para Simulação no MatLab e Simulink

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MODELO 1: Validação - Modelo do Paper SAE 650720 [19]
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Ref. Autor: Frederick Jindra
```

```
clear all
close all
dadosgindra;%arquivo de dados
```

```
%Componentes da Matriz de Massa e Inércia do Sistema (MATRIZ "A" - Pag
385)
```

```
X1=(M0+M1+M2+M3) ;
```

```
X2=- (M1l+M2l+M3l) ;
```

```
X3=- ( (M1*c1) + ( (M2+M3) *s1) ) ;
```

```
X4=- ( (M2*c2) + (M3*l2) ) ;
```

```
X5=-M3*c3;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Y1=M0*h;
```

```
Y2=I0;
```

```
Y3=0;
```

```
Y4=0;
```

```
Y5=0;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Z1=- ( (M1*c1) + ( (M2+M3) *s1) ) ;
```

```
Z2=I1+ (M1l*c1) + ( (M2l+M3l) *s1) ;
```

```
Z3=I1+ (M1* (c1^2) ) + ( (M2+M3) * (s1^2) ) ;
```

```
Z4= ( (M2*c2) + (M3*l2) ) *s1;
```

```
Z5=M3*c3*s1;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
W1=- ( (M2*c2) + (M3*l2) ) ;
```

```
W2=I2+ (M2l*c2) + (M3l*l2) ;
```

$$W3 = (M2 * c2) + ((M3 * l2) * s1);$$
$$W4=I2+(M2*(c2^2))+ (M3*(l2^2));$$
$$W5 = M3 * C3 * 12;$$
[illegible]
$$K1 = -M3 * C3;$$
$$K2=I3+(M31*c3);$$
$$K3=M3*c3*s1;$$

```
K4=M3*c3*12;
```

$$K5 = I3 + (M3 * (c3^2)) ;$$

```
%%%%%%%%%%  MATRIZ A
```

```
A=[X1 X2 X3 X4 X5;  
    Y1 Y2 Y3 Y4 Y5;  
    Z1 Z2 Z3 Z4 Z5;  
    W1 W2 W3 W4 W5;  
    K1 K2 K3 K4 K5];
```

[o/c](#)

%%%%%%%%DADOS DA MATRIZ B (pag 385)

```

XX1=- (N1F+N1R+N1+N2+N3) /V;
XX2=- ( (M0+M1+M2+M3) *V) + ( (N01+N11+N21+N31) /V) ;
XX3=( (N1*l1) + ( (N2+N3) *s1) ) /V;
XX4=N1;
XX5=(N2+N3) *l2/V;
XX6=N2;
XX7=N3*l3/V;
XX8=N3;
XX9=N1F;

```



```

YY1=(N01-((N1F+N1R)*h))/V;
YY2=-(M0*h*V)+(((N01*h)-(N1F*(a^2))-(N1R*(b^2))))/V;
YY3=0;
YY4=0;
YY5=0;
YY6=0;
YY7=0;
YY8=0;
YY9=N1F*(a+h);

```



```

ZZ1=( (N1*11)+( (N2+N3)*s1) )/V;
ZZ2=( ( (M1*c1)+( (M2+M3)*s1) ) *V) - ( ( (N11*11)+( (N21+N31)*s1) ) /V) ;
ZZ3=- ( (N1*(11^2) )+( (N2+N3)*(s1^2) ) ) /V;
ZZ4=-(N1*11) ;
ZZ5=-(N2+N3)*(12*s1/V) ;
ZZ6=-(N2*s1) ;
ZZ7=-N3*13*s1/V;
ZZ8=-N3*s1;
ZZ9=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

WW1=(N2+N3)*12/V;
WW2=( ( (M2*c2)+(M3*12) ) *V) - ( (N21+N31)*12/V) ;
WW3=-(N2+N3)*12*s1/V;
WW4=0;
WW5=- ( (N2+N3)*(12^2) ) /V;
WW6=-N2*12;
WW7=-N3*13*12/V;
WW8=-N3*12;
WW9=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

KK1=N3*13/V;
KK2=(M3*c3*V) - (N31*13/V) ;
KK3=-N3*13*s1/V;
KK4=0;
KK5=-N3*13*12/V;
KK6=0;
KK7=-N3*(13^2)/V;
KK8=-N3*13;
KK9=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MATRIZ B

B=[XX1 XX2 XX3 XX4 XX5 XX6 XX7 XX8 XX9;
   YY1 YY2 YY3 YY4 YY5 YY6 YY7 YY8 YY9;
   ZZ1 ZZ2 ZZ3 ZZ4 ZZ5 ZZ6 ZZ7 ZZ8 ZZ9;
   WW1 WW2 WW3 WW4 WW5 WW6 WW7 WW8 WW9;
   KK1 KK2 KK3 KK4 KK5 KK6 KK7 KK8 KK9];

C=inv(A)*B;

```


%%%MODELO 1: Validação - Dados de Entrada do Modelo do
Paper SAE 650720 [19]

%%%Autor: Frederick Jindra

%%%massa por unidade

W0=12000; %Peso do Veículo-Trator em lb

W1=28000; %Primeiro Semi-Reboque em lb

W2=2000; %Dolly intermediario em lb

W3=28000; %Segundo Semi-Reboque em lb

g=32.2;%ft/sec2

M0=W0/g;

M1=W1/g;

M2=W2/g;

M3=W3/g;

%%%yaw momento de inércia (lb ft sec2)

I0=100000; %Veículo-Trator

I1=700000; %Primeiro Semi-Reboque

I2=400; %Dolly

I3=700000; %Segundo Semi-Reboque

%%%dimensões (ft)

a=4;

b=6;

h=4;

c1=12;

l1=22;

s1=24;

c2=6;

l2=6;

c3=12;

l3=22;

%%%Rigidez torsional por roda (lb/rad)

N1F=47000;

N1R=38000*2;

N1=40000*2;

N2=38000*2;

N3=40000*2;

%%%Variáveis auxiliares (M'e N'do Paper)

M1l=M1*(h+c1);

M2l=M2*(h+s1+c2);

M3l=M3*(h+s1+l2+c3);

N0l=(N1R*b)-(N1F*a);

N1l=N1*(h+l1);

N2l=N2*(h+s1+l2);

N3l=N3*(h+s1+l2+l3);

%%%Velocidade 50 mph

V=73.33;% (ft/s)

[illegible]

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%DADOS DA MATRIZ B
```

```
XX1=- (N1+N2+N3+N4+N5+N6+N7) /V;
XX2=- (M0+M1+M2) *V+ (N11+N22+N33+N44+N55+N66+N77) /V;
XX3= ( (N4*l11+N5*l12) + (N6+N7) *s1) /V;
XX4=N4+N5;
XX5= (N6*l21+N7*l22) /V;
XX6=N6+N7;
XX7=N1;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
YY1= (N11+N22+N33- (N1+N2+N3) *h) /V;
YY2=-M0*h*V+ (-N1*a^2-N2*b1^2-N3*b2^2+ (N11+N22+N33) *h) /V;
YY3=0;
YY4=0;
YY5=0;
YY6=0;
YY7=N1* (a+h) ;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
ZZ1= (N4*l11+N5*l12+ (N6+N7) *s1) /V;
ZZ2= (M1*c1+M2*s1) *V- (N44*l11+N55*l12+ (N66+N77) *s1) /V;
ZZ3=- (N4*l11^2+N5*l12^2+ (N6+N7) *s1^2) /V;
ZZ4=- (N4*l11+N5*l12) ;
ZZ5=- (N6*l21+N7*l22) *s1/V;
ZZ6=- (N6*s1+N7*s1) ;
ZZ7=0;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
WW1= (N6*l21+N7*l22) /V;
WW2= (M2*c2) *V- (N66*l21+N77*l22) /V;
WW3=- (N6*l21+N7*l22) *s1/V;
WW4=0;
WW5=- (N6*l21^2+N7*l22^2) /V;
WW6=- (N6*l21+N7*l22) ;
WW7=0;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MATRIZ B
```

```
B=[XX1 XX2 XX3 XX4 XX5 XX6 XX7;
    YY1 YY2 YY3 YY4 YY5 YY6 YY7;
    ZZ1 ZZ2 ZZ3 ZZ4 ZZ5 ZZ6 ZZ7;
    WW1 WW2 WW3 WW4 WW5 WW6 WW7];
```

```
C=inv(A) *B;
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MODELO 2 - Dados de Entrada do Modelo - Bi-trem
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Avaliação do Performance e Estabilidade Lateral
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Combinação de Veículos de Carga (CVC) - Bi-trem

```

```
clear all
close all
%%%%%%%%%%%%%massa por unidade (kg)
%%%%%%%%%%%%% Na Condição COM CARGA
M0=8800; %Veículo-Trator
M1=24900; %Primeiro Semi-Reboque
M2=23900; %Segundo Semi-Reboque

%%%%%%%%%%%%%momento de inércia (kg.m2)
I0=47054; %Veículo-Trator
I1=164003; %Primeiro Semi-Reboque
I2=106165; %Segundo Semi-Reboque

%%%%%%%%%%%%%dimensões (m)
a=1.831;
b1=1.368;
b2=2.738;
h=1.743;
c1=2.697;
l11=5.955;
l12=7.205;
s1=7.100;
c2=3.101;
l21=3.735;
l22=4.985;

%%%%%%%%%%%%%Rigidez torsional por roda (N/rad)
N1=248211*2;
N2=184090*4;
N3=167542*4;
N4=175816*4;
N5=175816*4;
N6=175816*4;
N7=175816*4;

%%%%%%%%%%%%%Variáveis auxiliares
M11=M1*(h+c1);
M22=M2*(h+s1+c2);
N11=-N1*a;
N22=N2*b1;
N33=N3*b2;
N44=N4*(h+l11);
N55=N5*(h+l12);
N66=N6*(h+s1+l21);
N77=N7*(h+s1+l22);

%%%%%%%%%%%%%Velocidade 70 km/h
V=70/(3.6);
```


[illegible]

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MODELO 3 - Simulação dinâmica de um sistema articulado
RODOTREM
```

```
clear all
close all
dadosgindrarodo;%arquivo de dados
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Componentes da Matriz de Massa e Inércia do Sistema
```

```
X1=(M0+M1+M2+M3) ;
```

```
X2=- (M1l+M2l+M3l) ;
```

```
X3=- ( (M1*c1) + ( (M2+M3) *s1) ) ;
```

```
X4=- ( (M2*c2) + (M3*h2) ) ;
```

```
X5=-M3*c3;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Y1=M0*h;
```

```
Y2=I0;
```

```
Y3=0;
```

```
Y4=0;
```

```
Y5=0;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Z1=- (M1*c1) + ( (M2+M3) *s1) ;
```

```
Z2=I1+ (M1l*c1) + ( (M2l+M3l) *s1) ;
```

```
Z3=I1+ (M1* (c1^2) ) + ( (M2+M3) * (s1^2) ) ;
```

```
Z4= ( (M2*c2) + (M3*h2) ) *s1;
```

```
Z5=M3*c3*s1;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
W1=- ( (M2*c2) + (M3*h2) ) ;
```

```
W2=I2+ (M2l*c2) + (M3l*h2) ;
```

```
W3= (M2*c2+M3*h2) *s1;
```

```
W4=I2+ (M2* (c2^2) ) + (M3* (h2^2) ) ;
```

```
W5=M3*c3*h2;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
K1=-M3*c3;
```

```
K2=I3+(M31*c3);
```

```
K3=M3*c3*s1;
```

```
K4=M3*c3*h2;
```

```
K5=I3+(M3*(c3^2));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MATRIZ A
```

```
A=[X1 X2 X3 X4 X5;  
    Y1 Y2 Y3 Y4 Y5;  
    Z1 Z2 Z3 Z4 Z5;  
    W1 W2 W3 W4 W5;  
    K1 K2 K3 K4 K5];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DADOS DA MATRIZ B
```

```
XX1=- (N1+N2+N3+N4+N5+N6+N7+N8+N9) /V;  
XX2=- ( (M0+M1+M2+M3) *V) + ( (N11+N21+N31+N41+N51+N61+N71+N81+N91) /V) ;  
XX3= ( (N4*111+N5*112) + (N6+N7+N8+N9) *s1) /V;  
XX4=N4+N5;  
XX5= ( (N6*121+N7*122) + (N8+N9) *h2) /V;  
XX6=N6+N7;  
XX7= (N8*131+N9*132) /V;  
XX8=N8+N9;  
XX9=N1;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
YY1= ( - (N1+N2+N3) *h+N11+N21+N31) /V;  
YY2=- (M0*h*V) + ( ( (N11+N21+N31) *h) - (N1*(a^2)) - (N2*(b1^2)) - (N3*(b2^2)) ) /V;  
YY3=0;  
YY4=0;  
YY5=0;  
YY6=0;  
YY7=0;  
YY8=0;  
YY9=N1*(a+h);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
ZZ1= ( (N4*111+N5*112) + ( (N6+N7+N8+N9) *s1) ) /V;  
ZZ2= ( (M1*c1) + (M2+M3) *s1) *V-  
      ( ( (N41*111+N51*112) + ( (N61+N71+N81+N91) *s1) ) /V) ;  
ZZ3=- ( (N4*(111^2) + (N5*(112^2)) ) + ( (N6+N7+N8+N9) * (s1^2) ) ) /V;  
ZZ4=- (N4*111+N5*112);
```



```

ZZ5=- ( (N6*121+N7*122) + (N8+N9) *h2) *s1/V;
ZZ6=- (N6+N7) *s1;
ZZ7=- (N8*131+N9*132) *s1/V;
ZZ8=- (N8+N9) *s1;
ZZ9=0;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

WW1= ( (N6*121+N7*122) + (N8+N9) *h2) /V;
WW2= ( ( (M2*c2) + (M3*h2) ) *V) - ( (N61*121+N71*122) + (N81+N91) *h2) /V;
WW3=- ( (N6*121+N7*122) + (N8+N9) *h2) *s1/V;
WW4=0;
WW5=- ( (N6*121^2+N7*122^2) + (N8+N9) *h2^2) /V;
WW6=- (N6*121+N7*122) ;
WW7=- (N8*131+N9*132) *h/V;
WW8=- (N8+N9) *h2;
WW9=0;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

KK1= (N8*131+N9*132) /V;
KK2= (M3*c3*V) - (N81*131+N91*132) /V;
KK3=- (N8*131+N9*132) *s1/V;
KK4=0;
KK5=- (N8*131+N9*132) *h2/V;
KK6=0;
KK7=- (N8* (131^2)+N9* (132^2) ) /V;
KK8=- (N8*131+N9*132) ;
KK9=0;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MATRIZ B

```

```

B=[XX1 XX2 XX3 XX4 XX5 XX6 XX7 XX8 XX9;
   YY1 YY2 YY3 YY4 YY5 YY6 YY7 YY8 YY9;
   ZZ1 ZZ2 ZZ3 ZZ4 ZZ5 ZZ6 ZZ7 ZZ8 ZZ9;
   WW1 WW2 WW3 WW4 WW5 WW6 WW7 WW8 WW9;
   KK1 KK2 KK3 KK4 KK5 KK6 KK7 KK8 KK9];

```

```

C=inv(A) *B;

```

[illegible]

```
clear all
close all
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%massa por unidade - Condição com CARGA
W0=89271; %Peso do Veículo-Trator em N
W1=303619; %Primeiro Semi-Reboque + carga em N
W2=29430; %Dolly intermediário em N
W3=303619; %Segundo Semi-Reboque + carga em N
```

```
g=9.81; %m/seg2
```

$$\begin{aligned} M_0 &= W_0 / g; \\ M_1 &= W_1 / g; \\ M_2 &= W_2 / g; \\ M_3 &= W_3 / g; \end{aligned}$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Momento de inércia (kg.m2)
I0=52419; %Veículo-Trator
I1=168790; %Primeiro Semi-Reboque
I2=3713;%Dolly
I3=168790; %Segundo Semi-Reboque

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%dimensões (m)
a=1.831;
b1=1.368;
b2=2.738;
h=1.743;
c1=2.410;
l11=3.799;
l12=5.049;
s1=5.835;
c2=2.500;
h2=2.550;
l21=2.354;
l22=3.604;
c3=2.410;
l31=3.799;
l32=5.049;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Rigidez torsional por roda (N/rad)
N1=248211*2;
N2=175816*4;
N3=175816*4;
N4=175816*4;
N5=175816*4;
N6=175816*4;
N7=175816*4;
N8=175816*4;
N9=175816*4;

```

%%%%%%%%%%%%Variáveis auxiliares

[illegible]

[illegible]

[illegible]

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MODELO 3 - Dados de Entrada do Modelo - Rodotrem 1°.
Vazio e 2°. Carregado.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Avaliação do Performance e Estabilidade Lateral
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Combinação de Veículos de Carga (CVC) - RODOTREM

clear all
close all
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%massa por unidade - Condição 1o SR VAZIO e 2o SR CARREGADO
W0=89271; %Peso do Veículo-Trator em N
W1=51993; %Primeiro Semi-Reboque + carga em N
W2=29430; %Dolly intermediario em N
W3=303619; %Segundo Semi-Reboque + carga em N

g=9.81;%m/seg2

M0=W0/g;
M1=W1/g;
M2=W2/g;
M3=W3/g;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Momento de inércia (kg.m2)
I0=52419; %Veículo-Trator
I1=23489; %Primeiro Semi-Reboque
I2=3713; %Dolly
I3=168790; %Segundo Semi-Reboque

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%dimensões (m)
a=1.831;
b1=1.368;
b2=2.738;
h=1.743;
c1=3.243;
l11=3.799;
l12=5.049;
s1=5.685;
c2=2.500;
h2=2.550;
l21=2.126;
l22=3.276;
c3=2.410;
l31=3.799;
l32=5.049;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Rigidez torsional por roda (N/rad)
N1=209324*2;
N2=59819*4;
N3=59819*4;
N4=40189*4;
N5=40189*4;
N6=175816*4;
N7=175816*4;
N8=175816*4;
N9=175816*4;

```

[illegible]

ANEXO 2 - Diagrama do Simulink para o Bi-trem

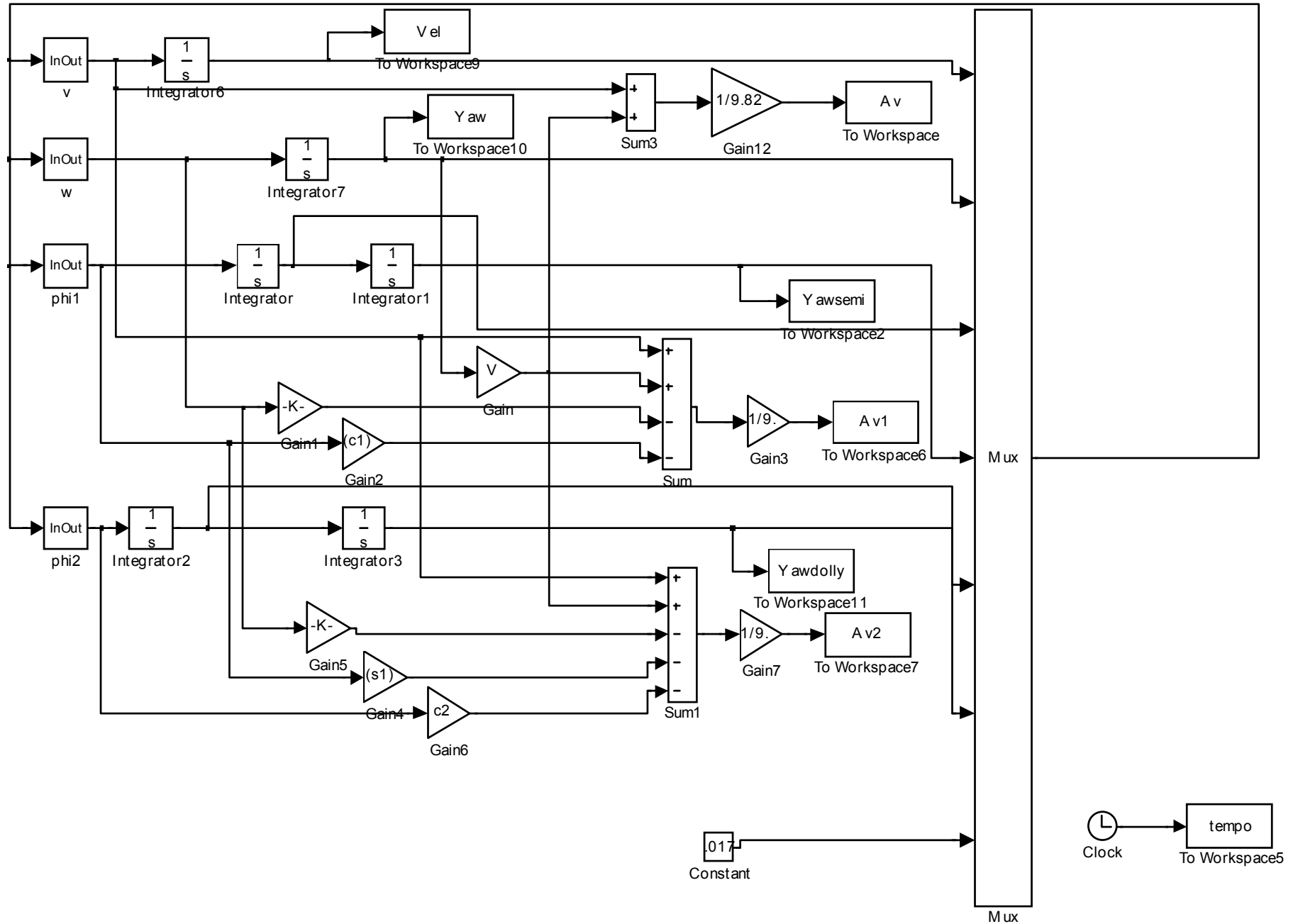


Diagrama do Simulink para o Rodotrem

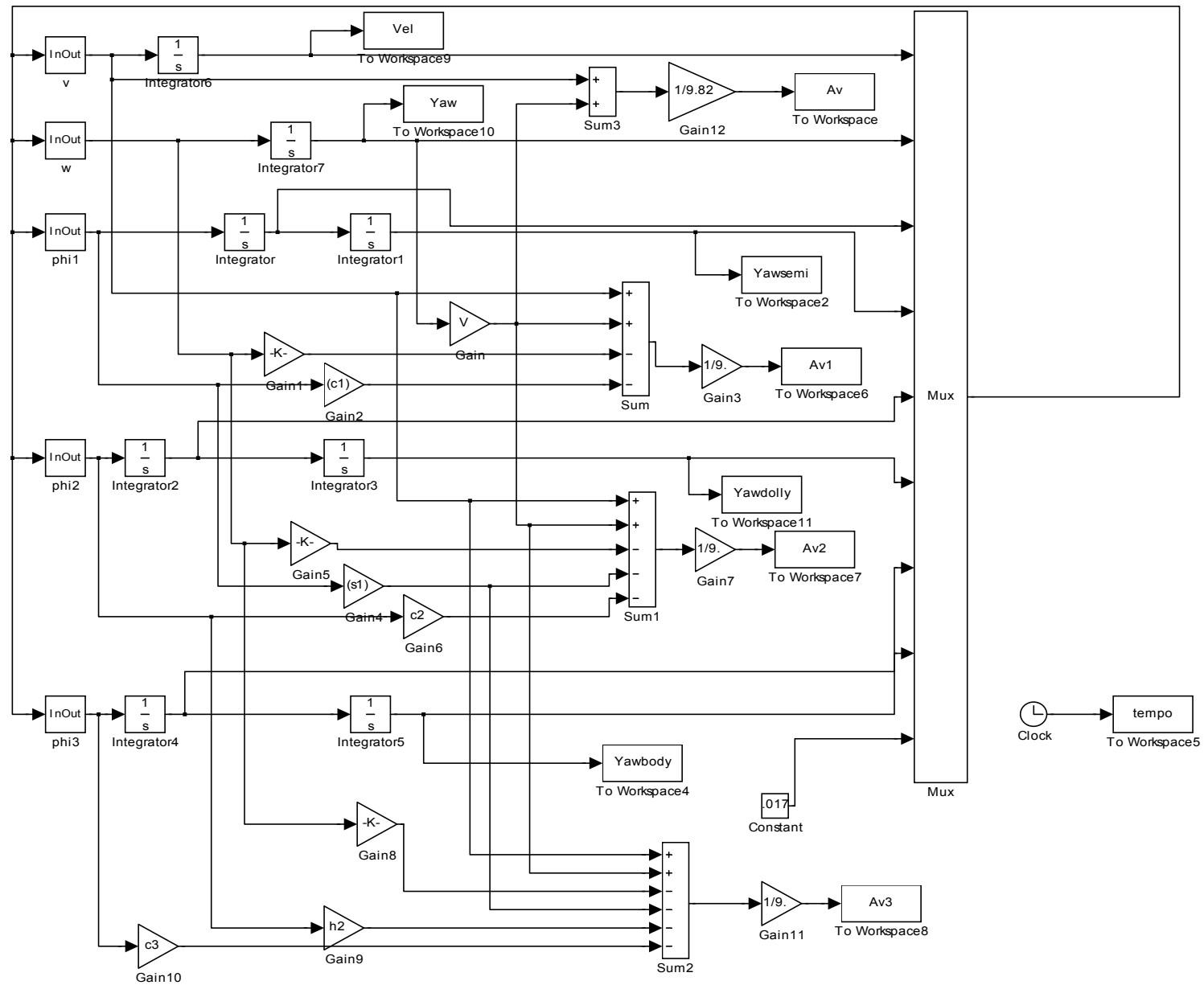


Diagrama do Simulink para o Bi-trem - com Entrada Senoidal

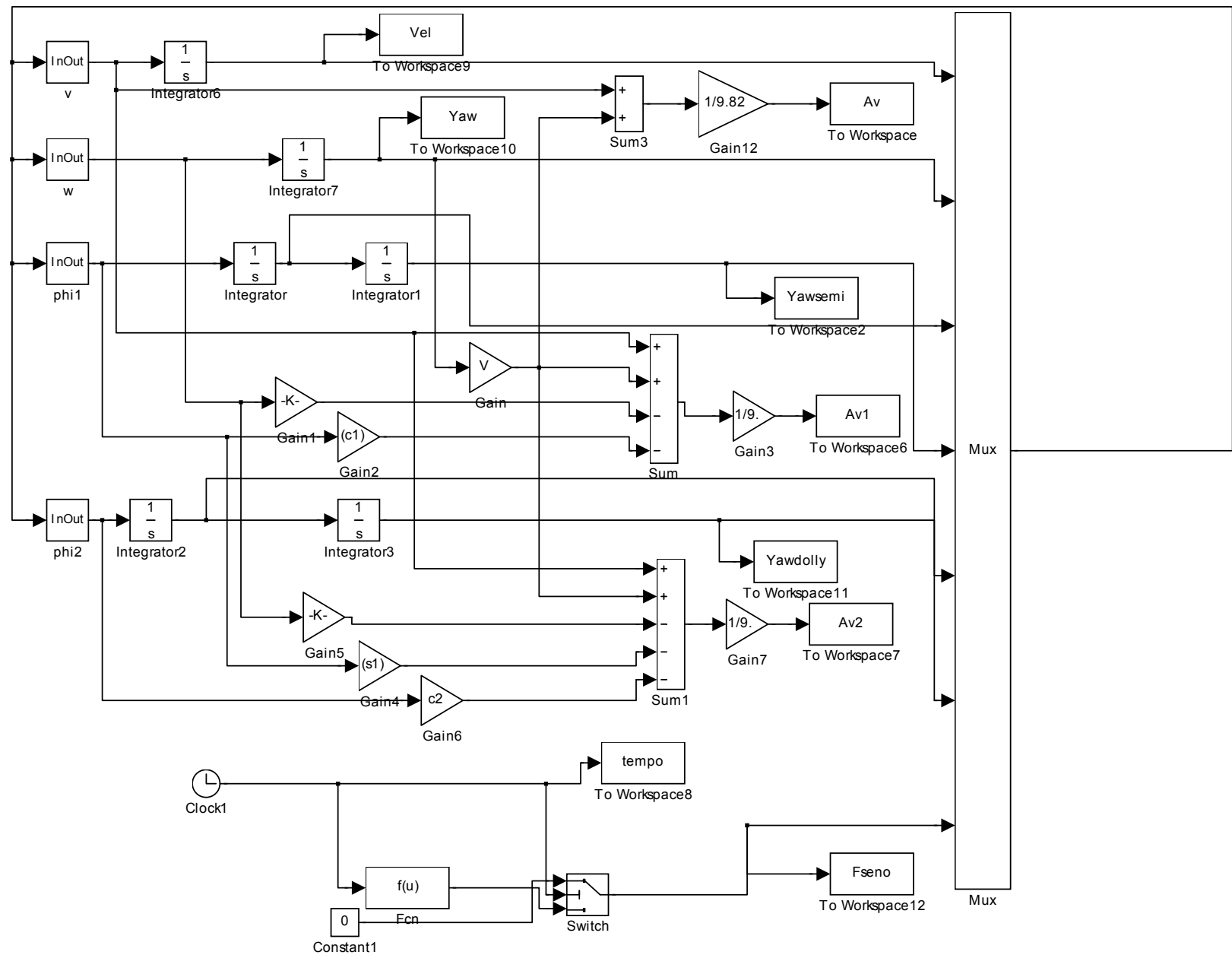
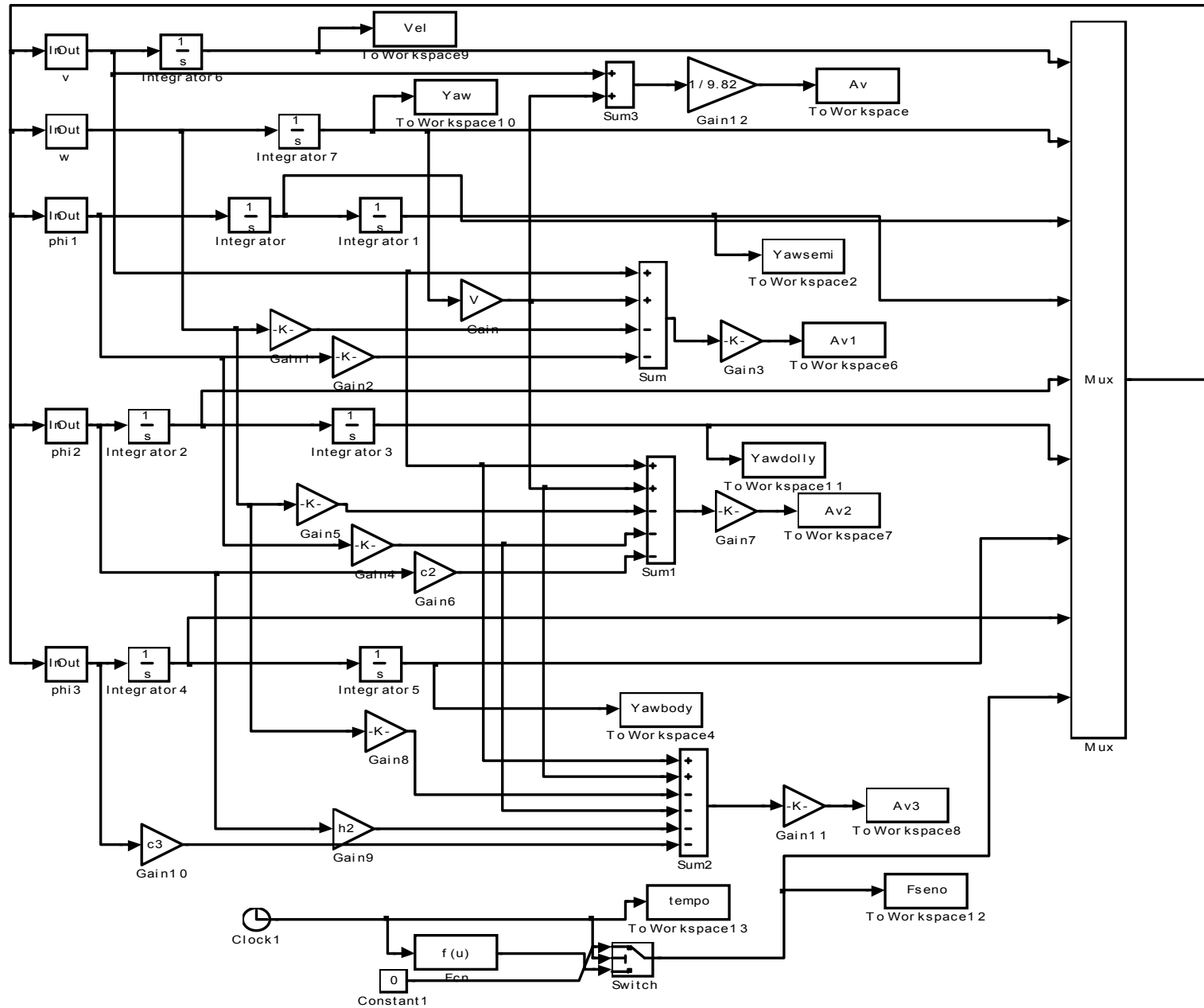


Diagrama do Simulink para o Rodotrem - com Entrada Senoidal



ANEXO 3

Rota 1: Acelerômetro 1 - Veículo-Trator

GPS	DATA	HORA	VELOCIDADE	LONGITUDE	LATITUDE	ACELERAÇÃO X	INCLINAÇÃO X Y	ACELERAÇÃO Y	INCLINAÇÃO Y
OK	24/04/04	09:47:05	11 Km/h	04919.0139	2532.0549	0,00	0,0°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:07	11 Km/h	04919.0170	2532.0602	0,04	2,3°	0,01	0,6°
NO	24/04/04	09:47:08	11 Km/h	04919.0177	2532.0624	0,01	0,6°	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:09	11 Km/h	04919.0190	2532.0649	0,03	1,7°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:10	11 Km/h	04919.0203	2532.0664	0,01	0,6°	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:13	12 Km/h	04919.0228	2532.0717	0,04	2,3°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:14	15 Km/h	04919.0236	2532.0734	0,04	2,3°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:15	16 Km/h	04919.0252	2532.0770	0,00	0,0°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:16	18 Km/h	04919.0270	2532.0807	0,12	6,9°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:17	19 Km/h	04919.0289	2532.0844	0,04	2,3°	0,02	1,1°
OK	24/04/04	09:47:18	19 Km/h	04919.0308	2532.0881	0,00	0,0°	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:19	19 Km/h	04919.0325	2532.0920	-0,05	-2,9°	-0,04	-2,3°
OK	24/04/04	09:47:20	20 Km/h	04919.0340	2532.0954	-0,03	-1,7°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:21	20 Km/h	04919.0357	2532.0986	0,00	0,0°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:22	20 Km/h	04919.0372	2532.1020	-0,03	-1,7°	-0,05	-2,9°
OK	24/04/04	09:47:23	20 Km/h	04919.0386	2532.1051	-0,01	-0,6°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:24	20 Km/h	04919.0401	2532.1081	-0,08	-4,6°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:25	20 Km/h	04919.0415	2532.1116	-0,05	-2,9°	-0,03	-1,7°
OK	24/04/04	09:47:26	20 Km/h	04919.0432	2532.1154	-0,20	-11,5°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:27	20 Km/h	04919.0452	2532.1176	-0,04	-2,3°	0,02	1,1°
OK	24/04/04	09:47:28	21 Km/h	04919.0471	2532.1210	-0,05	-2,9°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:29	21 Km/h	04919.0492	2532.1241	-0,04	-2,3°	-0,09	-5,2°
OK	24/04/04	09:47:30	21 Km/h	04919.0511	2532.1268	-0,01	-0,6°	-0,08	-4,6°
OK	24/04/04	09:47:31	21 Km/h	04919.0530	2532.1298	0,10	5,7°	-0,06	-3,4°
OK	24/04/04	09:47:32	21 Km/h	04919.0543	2532.1337	-0,02	-1,1°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:33	22 Km/h	04919.0558	2532.1375	-0,10	-5,7°	-0,04	-2,3°
OK	24/04/04	09:47:34	23 Km/h	04919.0575	2532.1412	-0,06	-3,4°	-0,04	-2,3°
OK	24/04/04	09:47:35	23 Km/h	04919.0597	2532.1444	-0,15	-8,6°	-0,04	-2,3°
OK	24/04/04	09:47:36	25 Km/h	04919.0623	2532.1474	-0,04	-2,3°	-0,03	-1,7°
OK	24/04/04	09:47:37	26 Km/h	04919.0655	2532.1509	-0,02	-1,1°	-0,02	-1,1°

OK	24/04/04	09:47:38	27 Km/h	04919.0686	2532.1544	0,13	7,5°	-0,13	-7,5°
OK	24/04/04	09:47:39	28 Km/h	04919.0714	2532.1584	0,02	1,1°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:40	29 Km/h	04919.0739	2532.1624	-0,01	-0,6°	-0,10	-5,7°
OK	24/04/04	09:47:41	29 Km/h	04919.0757	2532.1671	-0,02	-1,1°	-0,11	-6,3°
OK	24/04/04	09:47:42	29 Km/h	04919.0778	2532.1711	-0,08	-4,6°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:43	29 Km/h	04919.0801	2532.1745	-0,10	-5,7°	-0,04	-2,3°
OK	24/04/04	09:47:44	29 Km/h	04919.0820	2532.1788	-0,13	-7,5°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:45	30 Km/h	04919.0850	2532.1825	-0,10	-5,7°	-0,04	-2,3°
OK	24/04/04	09:47:46	31 Km/h	04919.0883	2532.1857	-0,09	-5,2°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:47	31 Km/h	04919.0915	2532.1893	-0,07	-4,0°	-0,05	-2,9°
OK	24/04/04	09:47:48	32 Km/h	04919.0947	2532.1933	0,01	0,6°	-0,03	-1,7°
OK	24/04/04	09:47:49	32 Km/h	04919.0977	2532.1976	0,01	0,6°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:50	33 Km/h	04919.1007	2532.2026	-0,10	-5,7°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:51	33 Km/h	04919.1036	2532.2070	-0,04	-2,3°	-0,04	-2,3°
OK	24/04/04	09:47:52	34 Km/h	04919.1066	2532.2110	-0,04	-2,3°	-0,10	-5,7°
OK	24/04/04	09:47:53	34 Km/h	04919.1095	2532.2158	-0,04	-2,3°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:54	34 Km/h	04919.1123	2532.2201	0,00	0,0°	0,01	0,6°
OK	24/04/04	09:47:55	34 Km/h	04919.1150	2532.2246				

Rota 1: Acelerômetro 2 – 2º. Semi-reboque

GPS	DATA	HORA	VELOCIDADE	LONGITUDE	LATITUDE	ACELERAÇÃO X	INCLINAÇÃO X	ACELERAÇÃO Y	INCLINAÇÃO Y
OK	24/04/04	09:47:05	11 Km/h	04919.0139	2532.0549	-0,01	-0,6°	0,02	1,1°
OK	24/04/04	09:47:07	11 Km/h	04919.0170	2532.0602	-0,01	-0,6°	-0,03	-1,7°
NO	24/04/04	09:47:08	11 Km/h	04919.0177	2532.0624	0,00	0,0°	-0,03	-1,7°
OK	24/04/04	09:47:09	11 Km/h	04919.0190	2532.0649	0,00	0,0°	-0,02	-1,1°
OK	24/04/04	09:47:10	11 Km/h	04919.0203	2532.0664	-0,02	-1,1°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:13	12 Km/h	04919.0228	2532.0717	-0,02	-1,1°	0,06	3,4°
OK	24/04/04	09:47:14	15 Km/h	04919.0236	2532.0734	0,05	2,9°	-0,07	-4,0°
OK	24/04/04	09:47:15	16 Km/h	04919.0252	2532.0770	0,05	2,9°	0,05	2,9°
OK	24/04/04	09:47:16	18 Km/h	04919.0270	2532.0807	0,03	1,7°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:17	19 Km/h	04919.0289	2532.0844	0,01	0,6°	0,05	2,9°
OK	24/04/04	09:47:18	19 Km/h	04919.0308	2532.0881	-0,05	-2,9°	-0,03	-1,7°
OK	24/04/04	09:47:19	19 Km/h	04919.0325	2532.0920	0,00	0,0°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:20	20 Km/h	04919.0340	2532.0954	0,00	0,0°	0,07	4,0°
OK	24/04/04	09:47:21	20 Km/h	04919.0357	2532.0986	0,02	1,1°	0,01	0,6°
OK	24/04/04	09:47:22	20 Km/h	04919.0372	2532.1020	0,00	0,0°	0,01	0,6°
OK	24/04/04	09:47:23	20 Km/h	04919.0386	2532.1051	-0,06	-3,4°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:24	20 Km/h	04919.0401	2532.1081	-0,10	-5,7°	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:25	20 Km/h	04919.0415	2532.1116	-0,02	-1,1°	0,04	2,3°
OK	24/04/04	09:47:26	20 Km/h	04919.0432	2532.1154	-0,13	-7,5°	0,01	0,6°
OK	24/04/04	09:47:27	20 Km/h	04919.0452	2532.1176	-0,11	-6,3°	0,05	2,9°
OK	24/04/04	09:47:28	21 Km/h	04919.0471	2532.1210	-0,13	-7,5°	0,07	4,0°
OK	24/04/04	09:47:29	21 Km/h	04919.0492	2532.1241	-0,05	-2,9°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:30	21 Km/h	04919.0511	2532.1268	-0,05	-2,9°	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:31	21 Km/h	04919.0530	2532.1298	-0,04	-2,3°	0,05	2,9°
OK	24/04/04	09:47:32	21 Km/h	04919.0543	2532.1337	0,01	0,6°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:33	22 Km/h	04919.0558	2532.1375	0,04	2,3°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:34	23 Km/h	04919.0575	2532.1412	0,04	2,3°	-0,11	-6,3°
OK	24/04/04	09:47:35	23 Km/h	04919.0597	2532.1444	-0,06	-3,4°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:36	25 Km/h	04919.0623	2532.1474	-0,22	-12,7	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:37	26 Km/h	04919.0655	2532.1509	-0,12	-6,9°	0,02	1,1°
OK	24/04/04	09:47:38	27 Km/h	04919.0686	2532.1544	-0,08	-4,6°	0,05	2,9°

OK	24/04/04	09:47:39	28 Km/h	04919.0714	2532.1584	0,03	1,7°	0,02	1,1°
OK	24/04/04	09:47:40	29 Km/h	04919.0739	2532.1624	0,13	7,5°	0,10	5,7°
OK	24/04/04	09:47:41	29 Km/h	04919.0757	2532.1671	0,05	2,9°	0,12	6,9°
OK	24/04/04	09:47:42	29 Km/h	04919.0778	2532.1711	-0,05	-2,9°	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:43	29 Km/h	04919.0801	2532.1745	-0,08	-4,6°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:44	29 Km/h	04919.0820	2532.1788	-0,14	-8,0°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:45	30 Km/h	04919.0850	2532.1825	-0,14	-8,0°	0,02	1,1°
OK	24/04/04	09:47:46	31 Km/h	04919.0883	2532.1857	-0,17	-9,8°	-0,07	-4,0°
OK	24/04/04	09:47:47	31 Km/h	04919.0915	2532.1893	-0,10	-5,7°	0,01	0,6°
OK	24/04/04	09:47:48	32 Km/h	04919.0947	2532.1933	0,01	0,6°	0,05	2,9°
OK	24/04/04	09:47:49	32 Km/h	04919.0977	2532.1976	0,08	4,6°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:50	33 Km/h	04919.1007	2532.2026	-0,03	-1,7°	0,00	0,0°
OK	24/04/04	09:47:51	33 Km/h	04919.1036	2532.2070	-0,09	-5,2°	-0,01	-0,6°
OK	24/04/04	09:47:52	34 Km/h	04919.1066	2532.2110	-0,02	-1,1°	0,08	4,6°
OK	24/04/04	09:47:53	34 Km/h	04919.1095	2532.2158	-0,07	-4,0°	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:54	34 Km/h	04919.1123	2532.2201	0,00	0,0°	0,03	1,7°
OK	24/04/04	09:47:55	34 Km/h	04919.1150	2532.2246				