5
Simulações e Resultados

Neste capítulo, apresentam-se os resultados da estimação dos parâmetros dinâmicos do veículo feitos por meio de diferentes métodos de otimização. Também se discutem os resultados obtidos.

5.1
Configuração dos Métodos de Otimização

Os parâmetros de entrada dos métodos de otimização utilizados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros de entrada dos métodos de otimização.

Método de otimização	Parâmetros de entrada	Valores nominais	
		4 GDL	Simulador
ED	Número de dimensões	8	10
	Tamanho da população	80	
	Número de Gerações	100	
	Peso F	0,85	
	Cruzamento	1	
	Erro mín. desejado	0,001	
GPS	Número de dimensões	8	10
	Número máx. de iterações	200	
	Erro mínimo desejado	0,01	
MADS	Número de dimensões	8	10
	Número máx. de iterações	200	
	Tamanho mínimo de malha	0,0001	
	Erro mín. desejado	0,01	
NM	Número de dimensões	8	10
	Número máx. de iterações	200	
	Erro mín. desejado	0,001	

5.2
Veículo de Referência

Um dos veículos comerciais mais utilizados são os Sedan, este modelo é utilizado como veículo de referencia para este trabalho. Este veículo é simulado

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

no programa de simulação veicular com os parâmetros nominais da Tabela 5.2, estas simulações do comportamento dinâmico são considerados dados reais.

Tabela 5.2: Lista de parâmetros nominais do veículo.

Numero	Parâmetros do Veículo	Valores nominais
1	Modelo	Classe sedan D
2	Massa suspensa	1370 kg
3	Massa não suspensa	80 kg (dianteiro), 110 kg (traseiro)
4	Distância entre eixos	2,78 m
5	Comprimento do eixo	1,55 m (dianteiro), 1,48 m (traseiro)
6	Distância do CG ao eixo frontal	1,11 m
7	Altura do CG	0,54 m
8	Momento de inércia de rolagem	606,1 $kg.m^2$
9	Momento de inércia de arfagem	4192 $kg.m^2$
10	Momento de inércia de guinada	4192 $kg.m^2$
11	Sistema de suspensão	MacPherson (dianteiro), Twist beam (traseiro)
12	Rigidez da mola da suspensão	82 N/mm (dianteiro), 35 N/mm (traseiro)
13	Sistema de direção	Coroa e pinhão
14	Pneus	215/55R17
15	Raio dos pneus	0,335 m

5.3 Análise de Sensibilidade

A analise de sensibilidade serve para determinar quais saídas são mais sensíveis à variação de determinados parâmetros do sistema dinâmico. O estudo da sensibilidade fornece informações importantes para a metodologia da estimação dos parâmetros dinâmicos do veículo, já que se conhecera que tipo de saída é ótima para estimar um parâmetro ou um conjunto deles.

Para o estudo da sensibilidade considera-se o modelo do veículo de 4GDL. A análise de sensibilidade é feita no estado transitório do sistema dinâmico, isto para considerar as variações das variáveis de saída (variáveis de estado), já que no estado estacionário a análise não seria possível por a inexistência de variações nas saídas. Baseados nas respostas obtidas da simulação do veículo, determina-se que o regimen transiente se desenvolve aproximadamente até $2s$, portanto a análise de sensibilidade é feita dentro deste intervalo de tempo. Na Figura 5.1, observa-se as entradas, saídas e os parâmetros que são necessários para a analise de sensibilidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

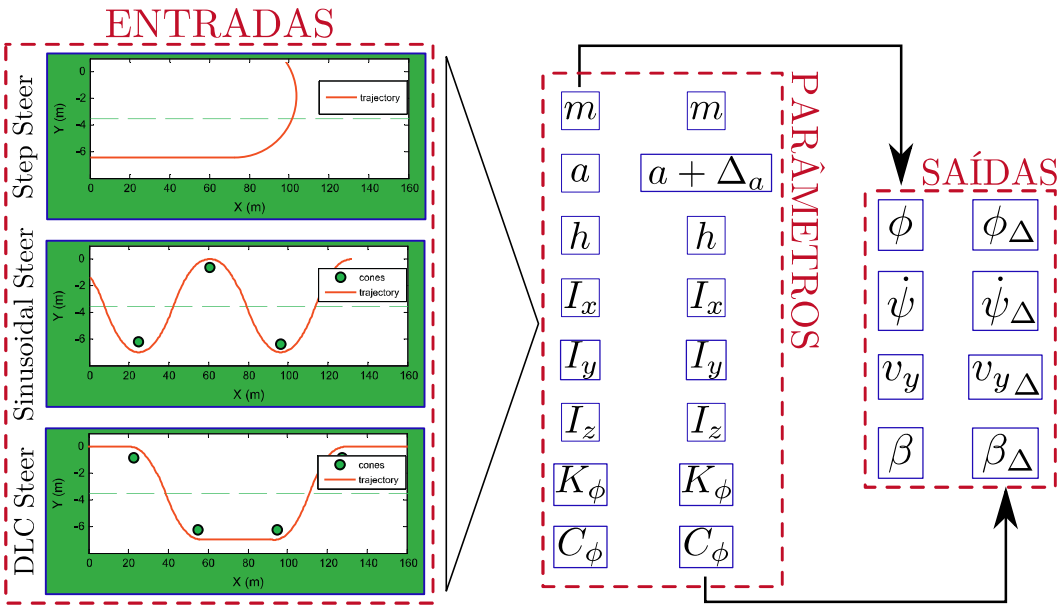

Figura 5.1: Diagrama de fluxo do analise de sensibilidade.

Para obter a curva de sensibilidade de cada parâmetro, utiliza-se a Equação (4-3). Logo, se calcula a área abaixo da curva de sensibilidade de cada parâmetro para obter um valor numérico representativo que possa ser comparado.

Observa-se na Figura 5.2 que todos os parâmetros, exceto o I_y, são sensíveis ao *Step Steer*. Nota-se também que os parâmetros m, a e h têm uma alta influência sobre a velocidade lateral v_y e o ângulo de deslizamento lateral β do veículo, o que não acontece com os outros parâmetros e saídas. Portanto, em princípio, a saída utilizada para o cálculo da função objetivo seria v_y ou β, porém o modelo de 4GDL não fornece esta variável de estado com precisão. Então, descarta-se a estimação utilizando esta manobra.

Pode-se concluir desta parte da análise de sensibilidade que as variáveis de estado v_y e β não podem ser utilizadas para o cálculo da função objetivo. Por conseguinte, nas seguintes partes do estudo considera-se só o ângulo de rolagem ϕ e a taxa de rolagem $\dot{\phi}$ como possíveis variáveis no cálculo da função objetivo.

Nas Figuras 5.3 e 5.4 observa-se que todos os parâmetros são sensíveis às manobras de tipo sinusoidal e DLC. Nota-se também que os parâmetros têm uma alta influência sobre o ângulo de rolagem ϕ e em menor nível sobre a taxa de variação de guinada, $\dot{\psi}$.

Como foi concluído na parte anterior, as variáveis v_y e β não são consideradas aliás, os parâmetros tenham um alta influência sobre estas variáveis. Para estas manobras tanto o ângulo de rolagem ϕ como a velocidade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

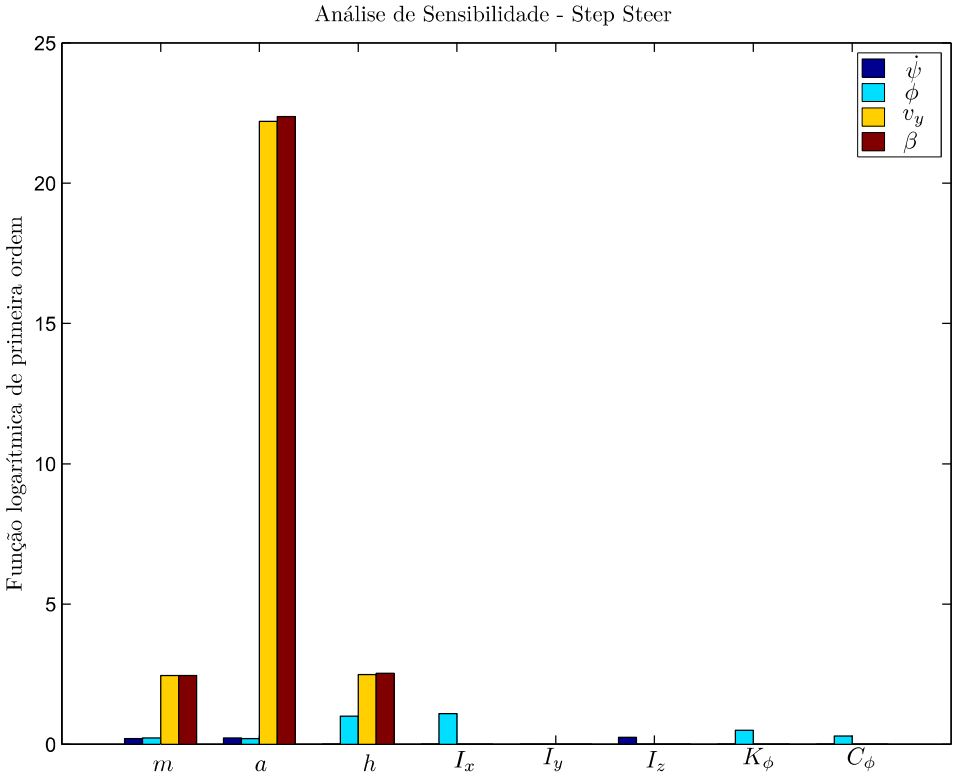

Figura 5.2: Resposta das variáveis de estado do veículo aplicando a função logarítmica de primeira ordem para uma manobra *Step Steer*.

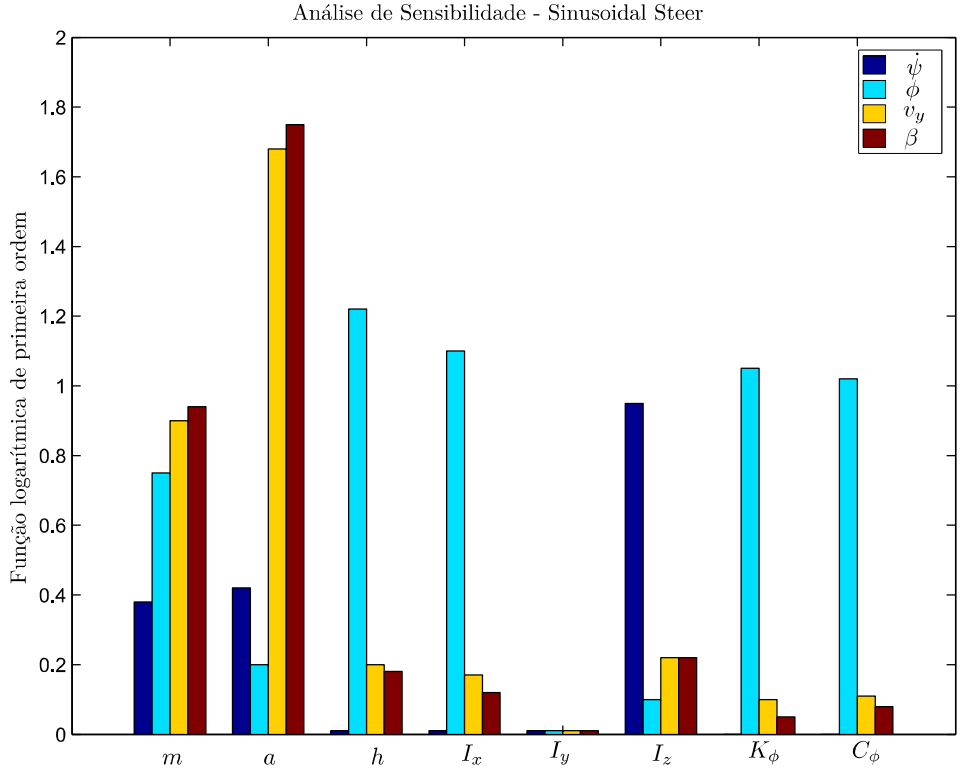

Figura 5.3: Resposta das variáveis de estado do veículo aplicando a função logarítmica de primeira ordem para uma manobra Sinusoidal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

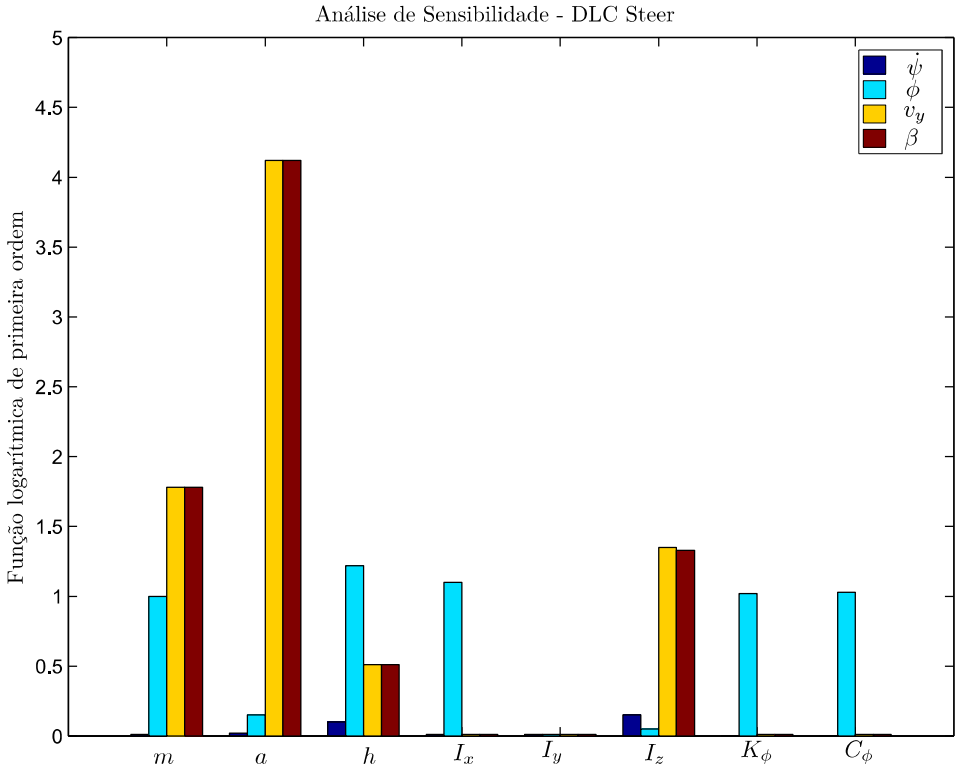

Figura 5.4: Resposta das variáveis de estado do veículo aplicando a função logarítmica de primeira ordem para uma manobra *Double Lane Change* (DLC).

de guinada $\dot{\psi}$ podem ser utilizadas para o cálculo da função objetivo. Devido às similaridades de sensibilidade obtidas com estas manobras, utilizou-se para o cálculo da função objetivo as variáveis de saída ϕ e $\dot{\psi}$ da manobra sinusoidal. O uso destas variáveis para o cálculo da função objetivo é adequado, não só por sua alta influência sobre a maioria de parâmetros dinâmicos, como também porque estas variáveis podem ser obtidas de maneira precisa com o modelo de 4GDL, como se mostrou no capítulo 2. Portanto, a função objetivo que será utilizada por todos os métodos de otimização, tanto para o modelo de 4GDL como para o modelo da caixa-preta (obtido pelo programa de simulação) é expressa como:

$$\text{Função Objetivo } (modelo) = \sum_{i=1}^{n}[R_{\phi}^{i} - G_{\phi}^{i}]^2 + \sum_{i=1}^{n}[R_{\dot{\psi}}^{i} - G_{\dot{\psi}}^{i}]^2 \qquad (5\text{-}1)$$

5.4 Estimação dos Parâmetros

Nesta seção são apresentados os resultados dos diferentes métodos de otimização aplicados à estimação dos parâmetros dinâmicos. Para a estimação, uma manobra é escolhida de acordo com a análise de sensibilidade dos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

parâmetros feito na seção anterior. Na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados da estimação utilizando os métodos de otimização estudados na seção 3 e considerando o análise de sensibilidade.

Tabela 5.3: Resultados da Estimação

Parâmetro	ED		GPS		MADS		NM	
	Black-box	4GDL	Black-box	4GDL	Black-box	4GDL	Black-box	4GDL
$m\ [kg]$	1358,1	1300	1340,6	1400	1370	1352	1369,5	1357,5
$a\ [m]$	1,1138	1,12	1,128	1,14	1,108	1,1	1,115	1,1124
$h\ [m]$	0,538	0,526	0,536	0,52	0,542	0,556	0,54	0,542
$I_x\ [kg.m^2]$	598,88	630,79	630,79	636	622,14	613	603,5	599,76
$I_y\ [kg.m^2]$	4180,9	3896,9	3997	4575,5	4157,5	4040	4190,5	4107,2
$I_z\ [kg.m^2]$	4172,7	4019	4049,3	4262,5	4192,4	4154	4186,7	4153,5
$K_\phi\ [\frac{N.m}{rad}]$	-	146.10^3	-	144.10^3	-	147.10^3	-	149.10^3
$C_\phi\ [\frac{N.m.s}{rad}]$	-	$7{,}5.0^3$	-	$7{,}3.10^3$	-	$7{,}8.10^3$	-	$7{,}9.10^3$

Em seguida, calcula-se os erros obtidos por cada método de otimização, como mostrado na Tabela 5.4. Para determinar que método tem um melhor desempenho utilizou-se a média do erro, calculado para cada uns dos parâmetros dinâmicos estimados.

Tabela 5.4: Erros de Estimação

	Valor	Erro ED (%)		Erro GPS (%)		Erro MADS (%)		Erro NM (%)	
		Black-box	4GDL	Black-box	4GDL	Black-box	4GDL	Black-box	4GDL
m	1370	0,88	5,38	2,2	3,1	0	1,33	0,03	1,0
a	1,11	0,34	0,9	1,6	2,6	0,18	0,9	0,44	0,21
h	0,54	0,37	2,6	0,74	3,84	0,36	2,9	0	0,36
I_x	606,1	1,2	3,9	3,9	4,7	2,57	1,12	0,43	1,0
I_y	4192	0,26	7,4	4,9	8,38	0,82	3,76	0,03	2,0
I_z	4192	0,46	4,3	3,52	1,65	0,1	0,91	0,12	1,0
	$\frac{\sum erro}{n}$	0,58	4,0	2,81	4,0	0,67	1,82	0,17	0,92

Observa-se um melhor desempenho do método de Nelder-Mead utilizando ambos modelos o do *black-box* (obtido pelo simulador) e o modelo de 4GDL. Nota-se também que os resultados obtidos com todos os métodos utilizando o modelo *black-box* foram melhores que utilizando o de 4GDL. Isto pode ser explicado, já que o modelo de 4GDL não abrange o comportamento dinâmico do veículo real. O que acontece em maior nível com o modelo *black-box*, já que este é obtido de um simulador dinâmico.

O método de Nelder-Mead além de ter uma menor média do erro, também apresenta um custo computacional menor que o do método de Evolução Diferencial e similar aos outros métodos. Este indicador é mostrado na Figura 5.5. No entanto, o método de Evolução Diferencial não precisa de um ponto inicial para começar sua evolução, o que acontece com os outros métodos. Esta característica pode ser uma vantagem, já que para escolha de um ponto inicial se requer algum conhecimento do sistema. Isto quer dizer conhecer uma faixa de valores para os parâmetros dinâmicos, o qual nem sempre é possível.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

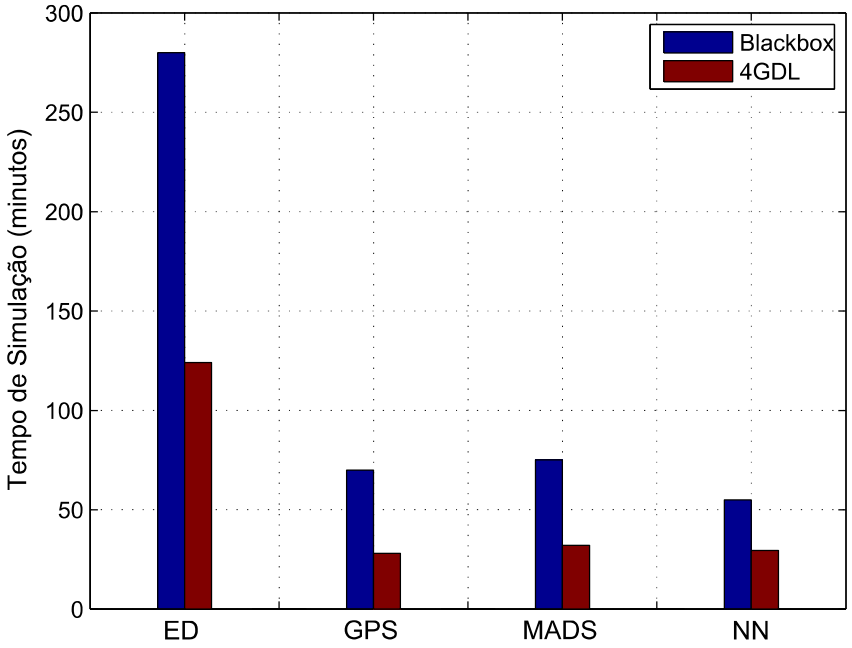

Figura 5.5: Comparação dos tempos de simulação da estimação obtidos com os diferentes métodos de otimização.

Para a visualização dos resultados se gráfica as saídas dos modelos já calibrados, isto é feito para várias manobras para comprovar a robustez e coerência da estimação. As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 são respostas do modelo obtidas com uma manobra do tipo *Step Steer*. Observa-se que existe uma boa precisão nos ângulos de rolagem ϕ e a velocidade angular de guinada $\dot{\psi}$ do veículo, porém a velocidade lateral v_y do modelo de 4GDL não apresenta uma boa correspondência com os dados referência e o modelo feito com o programa de simulação (*black-box*). Desde que nossa aplicação está centrado na dinâmica de rolagem, pode-se aceitar as curvas obtidas como confiáveis.

Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, são obtidas de uma manobra do tipo *Sinusoidal Steer*. Observa-se um comportamento similar ao analisado anteriormente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

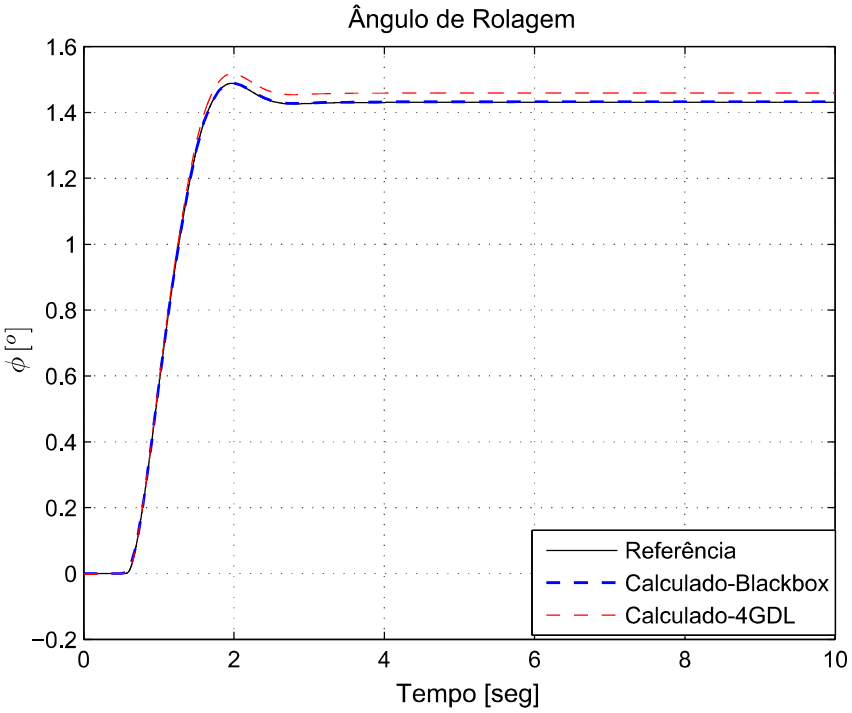

Figura 5.6: Comparação do ângulo de rolagem ϕ numa manobra do tipo *Step Steer*.

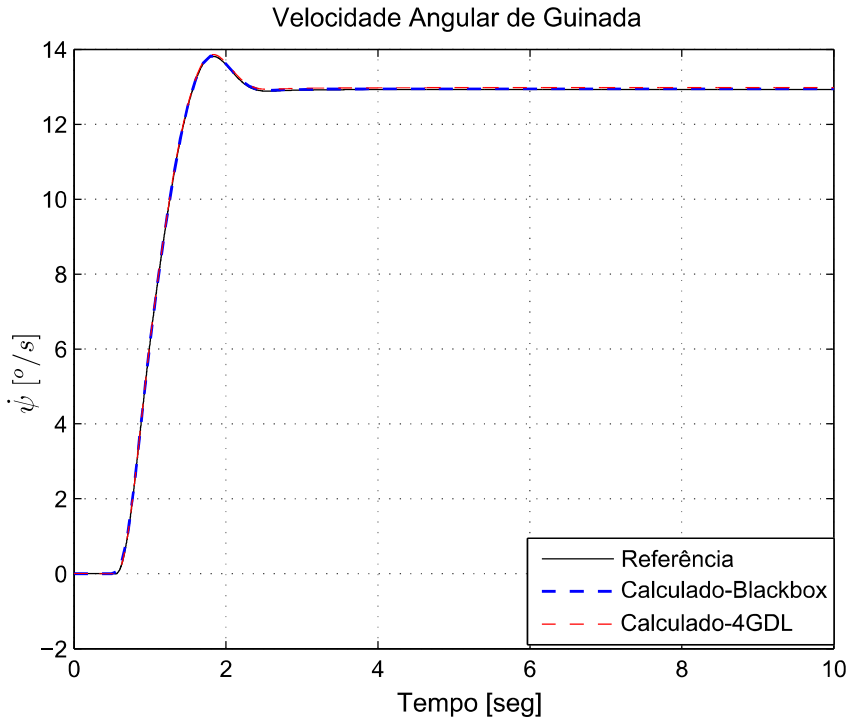

Figura 5.7: Comparação da velocidade angular de guinada $\dot{\psi}$ numa manobra do tipo *Step Steer*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

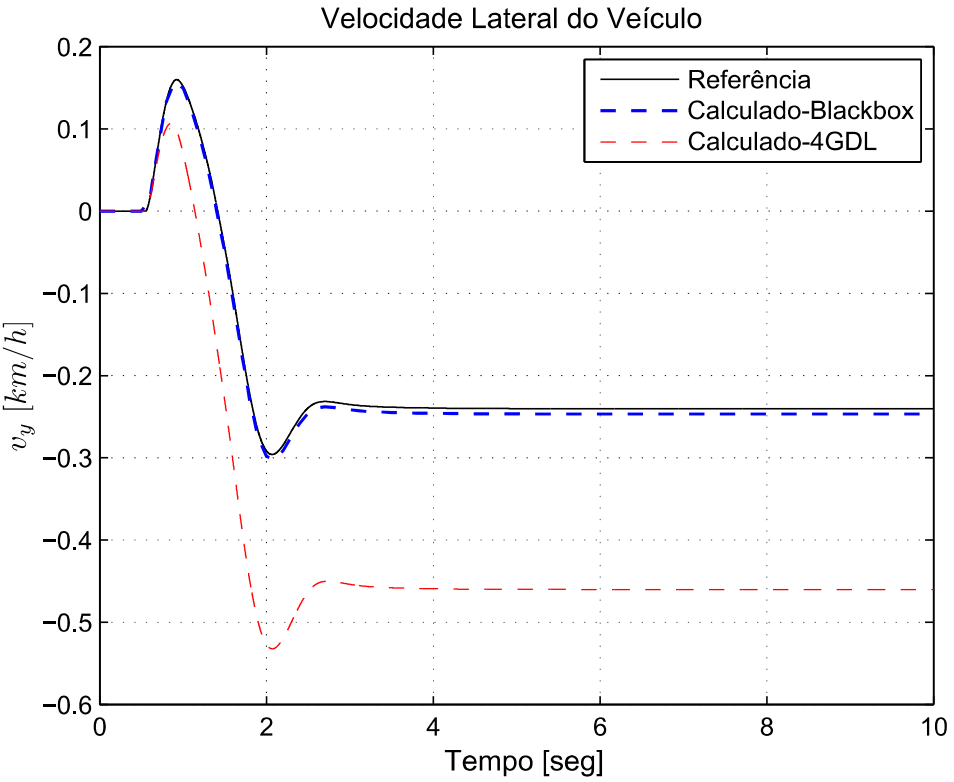

Figura 5.8: Comparação da velocidade lateral do veículo v_y numa manobra do tipo *Step Steer*.

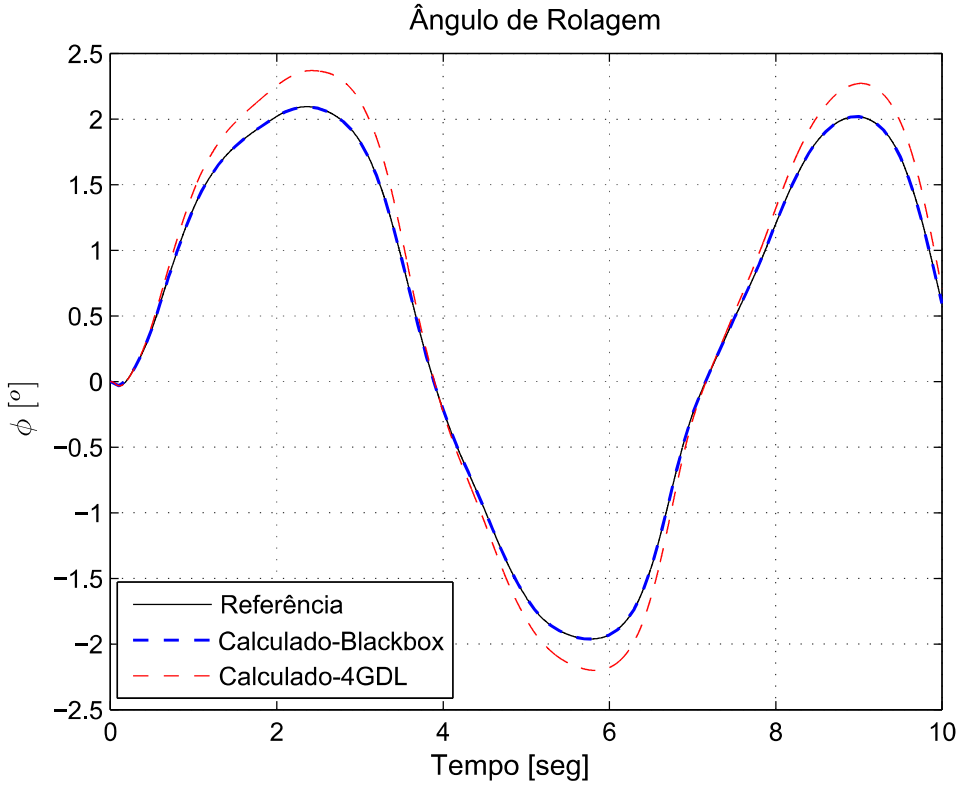

Figura 5.9: Comparação do ângulo de rolagem ϕ numa manobra do tipo sinusoidal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

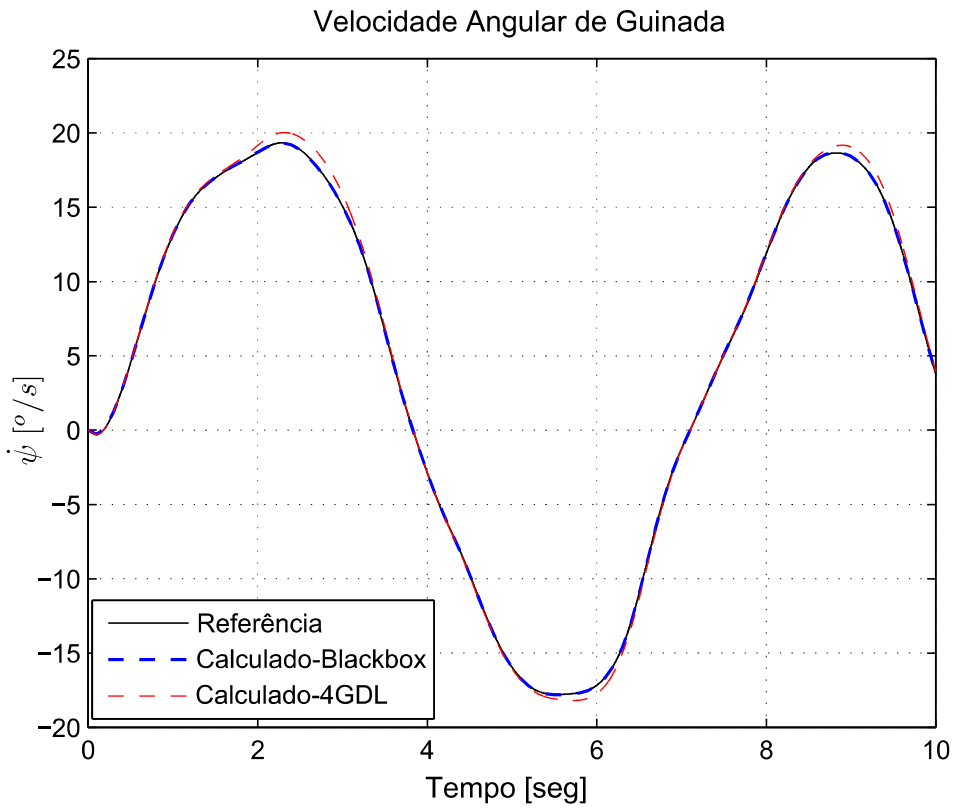

Figura 5.10: Comparação da velocidade angular de guinada $\dot{\psi}$ numa manobra do tipo sinusoidal.

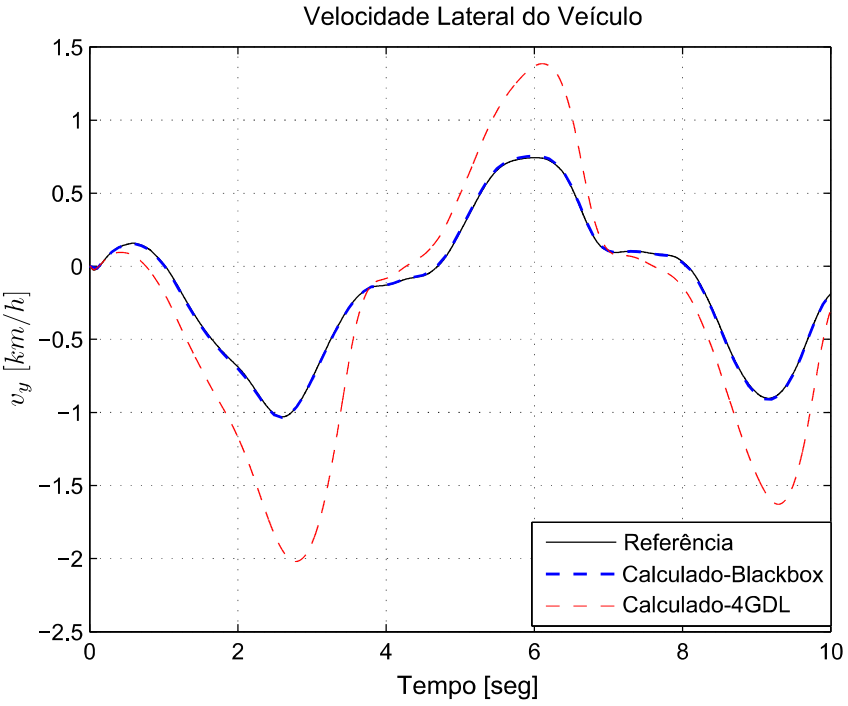

Figura 5.11: Comparação da velocidade lateral do veículo v_y numa manobra do tipo sinusoidal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

5.5 Avaliação Visual

A visualização dos resultados foram feitas dentro do entorno MATLAB, nas Figuras 5.12 e 5.13, apresenta-se os resultados visuais obtidos com as manobras *step steer* e *sinusoidal steer*.

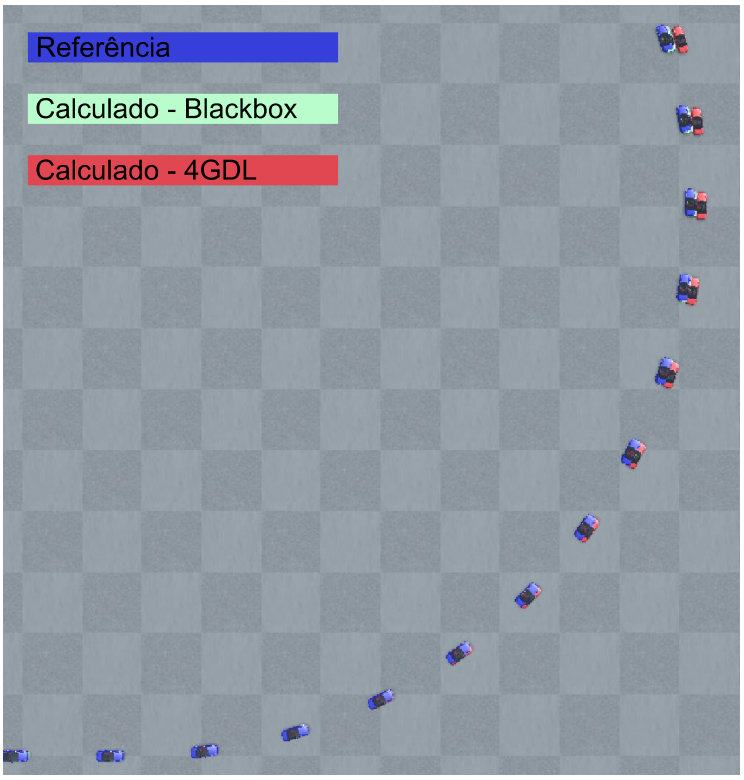

Figura 5.12: Comparação das trajetórias do veículo com a manobra tipo *Step Steer*.

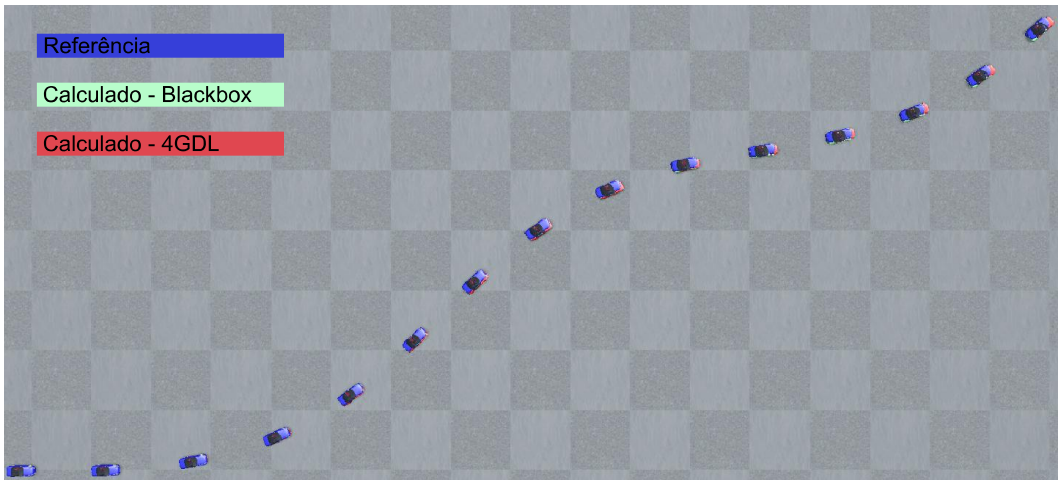

Figura 5.13: Comparação das trajetórias do veículo com a manobra tipo *Sinusoidal Steer*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA

Observa-se em ambas figuras uma pequena diferença entre a trajetória obtida com o modelo tipo black-box e a trajetória de referência. Entretanto, existe um maior erro entre a referência e a trajetória obtida pelo modelo de 4GDL. Esta diferença é devido a que o modelo da black-box representa de maneira mais exata (mais graus de liberdade - 15GDL) a dinâmica do veículo, ao contrário o modelo de 4GDL tem limitações como se mostrou na seção 2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1121430/CA