

Agentes Autónomos Controláveis em Simuladores de Condução

João Miguel Queirós Magno Leitão

Professor Adjunto

Instituto Superior de Engenharia do Porto.

jml@dee.isep.ipp.pt

Dissertação realizada sob a orientação científica do

Professor Doutor Fernando Nunes Ferreira,

Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de

Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Setembro de 2000

Para a Cristina, a Ana Luísa e o João Nuno.

Prefácio

Desde que terminei a Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, em 1989, tenho-me dedicado, no âmbito da Computação Gráfica, à investigação nas áreas de síntese de imagem realista e Realidade Virtual. A estas escolhas, não é alheio o assumido gosto, por um lado, da integração tecnológica que as aplicações de Realidade Virtual motivam, e por outro, da simulação de fenómenos físicos em que pode ser baseada a síntese de imagens realistas e a animação.

A possibilidade de integrar uma equipa multi-disciplinar com o objectivo de desenvolver um simulador de condução realista surgiu assim como uma oportunidade única de ligação da simulação física com a síntese de imagem em tempo real, mantendo ainda uma forte componente de integração tecnológica. Para além das perspectivas científicas que me eram oferecidas, a possibilidade de participar num projecto de grande envergadura, de utilidade inquestionável e de visibilidade promissora, desde logo me entusiasmou.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Nunes Ferreira, a confiança plena, a colaboração permanente, o apoio incondicional e todos os úteis conselhos que muito contribuíram para esta dissertação.

Ao meu co-orientador, Augusto Sousa, o tempo despendido, as ideias, os bons conselhos, as perguntas, as discussões frutuozas, as inúmeras revisões, todo o apoio prestado e a disponibilidade sempre demonstrada.

A todos os que colaboram ou colaboraram no Simulador de Condução DriS, em especial ao António Coelho, ao Jorge Santos e ao Carlos Rodrigues, toda a colaboração, motivação e requisitos que permitiram o enquadramento deste trabalho num grande projecto.

Ao ISEP, a todos os colegas do Departamento de Eng. Electrotécnica e, em especial, aos do grupo de Automação e Robótica, pelas condições de trabalho criadas.

Aos colegas do Grupo de Computação Gráfica do INESC Porto, o auxílio, os comentários, o interesse e a boa disposição.

Ao PRODEP, à FCT, ao IPP, ao IDT, à FEUP, ao INESC Porto, à FLAD e à Fundação Calouste Gulbenkian, os apoios concedidos sem os quais este trabalho não teria sido possível.

À minha família, em especial à Cristina, à Ana Luísa e à minha Mãe, toda a paciência demonstrada e a indispensável compreensão.

Palavras Chave

Simulação Visual
Interacção Realista
Agentes Autónomos
Modelos Comportamentais
Níveis de Detalhe
Realidade Virtual
Condução Automatizada
Tráfego Autónomo
Veículos Inteligentes

Keywords

Visual Simulation
Realistic Interaction
Virtual Reality
Levels of Detail
Behaviour Models
Driving Simulators
Autonomous Agents
Autonomous Traffic
Automated Driving
Intelligent Vehicles

Resumo

Esta dissertação apresenta o trabalho realizado no âmbito do desenvolvimento de um simulador de condução realista, destinado à realização de experiências científicas de avaliação de traçados rodoviários e de comportamentos de condutores. O protótipo implementado (DriS), é funcionalmente comparável aos melhores simuladores de condução de base fixa existentes na Europa, como se comprova pelas experiências apresentadas, algumas já realizadas e outras em preparação.

Para facilitar as tarefas de especificação de ambientes rodoviários extensos e com grandes densidades de tráfego, este simulador de condução permite a inclusão de um grande número de veículos com um grau de autonomia elevado. O elevado peso computacional associado à simulação destes elementos autónomos foi minimizado, graças à aplicação de uma técnica inovadora de variação do nível de detalhe comportamental. A qualidade desta técnica é comprovada pelos resultados da experiência de avaliação também apresentada.

Para possibilitar a imposição de acontecimentos de tráfego precisos, foi prevista uma metodologia de controlo externo dos agentes de tráfego envolvidos, de forma simples e eficiente. Esta metodologia é orientada para não especialistas em informática e permite o desencadeamento de ações de controlo, de níveis diversos, em função de situações de tráfego determinadas.

Abstract

This document presents the development of a realistic driving simulator aimed to the scientific experimentation in the fields of road engineering and driver behaviour. As it is shown by several completed and current applications, the implemented prototype (DriS), is functionally comparable to the most advanced fixed-based driving simulators in Europe.

In order to facilitate the specification of extensive road environments, with great densities of traffic, this driving simulator allows the inclusion of a large number of vehicles with a high degree of autonomy. The great computational weight associated to the simulation of these autonomous elements was minimized, thanks to the application of an innovating technique concerning the level variation of behaviour detail. The quality of this technique is confirmed by the results of an evaluation experience, also presented here.

To accomplish the imposition of required traffic events, a method was conceived that easily and efficiently allows the external control of the involved traffic agents. This method can be used by non-specialists in computer science and allows the trigger of some control orders, from different levels, according to the expected traffic events.

Résumé

Ce document présente le développement d'un simulateur de conduite réaliste, destiné à l'expérimentation scientifique dans les domaines de la sécurité routière et du comportement du conducteur. Plusieurs applications déjà réalisées et d'autres qui sont en train d'être préparées prouvent que le prototype mis en application (DriS) est fonctionnellement comparable aux autres simulateurs de conduite de base fixe les plus avancés en Europe.

Afin de faciliter la préparation des environnements routiers, avec de grandes densités de trafic, ce simulateur de conduite permet l'inclusion d'un grand nombre de véhicules ayant un haut degré d'autonomie. Le grand poids du calcul associé à la simulation de ces éléments autonomes a été réduit au minimum, grâce à l'application d'une technique innovatrice de la variation du niveau du détail de comportement. La qualité de cette technique est prouvée par les résultats d'une expérience d'évaluation, présentée elle-aussi.

Pour permettre l'imposition des événements du trafic exigés, on a conçu une méthode, grâce à laquelle la commande externe des agents du trafic impliqués devient possible, d'une façon facile et efficace. Ceux-là mêmes qui ne sont pas des experts en informatique peuvent utiliser cette méthode et elle leur permettra de déclencher des commandes de niveaux différents, selon les événements du trafic choisis.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Objectivos	3
1.2 Organização da dissertação	4
1.3 Contribuições inovadoras	5
2. Simuladores de Condução	7
2.1 Arquitectura geral	9
2.2 Definição de cenários	10
2.3 Modelo dinâmico	12
2.4 Posto de condução	15
2.4.1 Sensação de aceleração.....	15
2.4.2 Sensação de força no volante	17
2.5 Síntese de som.....	18
2.6 Síntese de imagem.....	18
2.6.1 Organização e selecção de objectos.....	21
2.6.2 Nível de detalhe.....	22
2.6.3 Controlo da taxa de refrescamento	24
2.6.4 Billboards	25
2.7 Tecnologias disponíveis	25
2.7.1 VRML	25
2.7.2 Opengl	25
2.7.3 Performer.....	26
2.8 Exemplos de simuladores de condução	29
2.8.1 O simulador de condução LADS.....	30
2.8.2 Simulador de condução do TNO	30
2.8.3 O simulador de condução do RUG-COV	31
2.8.4 Simuladores de condução do VTI	32
2.8.5 Simuladores de condução na Universidade de Iowa	33
2.8.6 Simulador de condução do UMTRI.....	35
2.8.7 O simulador de condução da DRI.....	35
2.8.8 O simulador de condução da Daimler-Benz.....	36
2.8.9 Simuladores da Renault.....	37
2.9 Sumário	38

3. Agentes Autónomos	41
3.1 O Condutor Humano	42
3.1.1 Modelos de condutores	44
3.1.2 Objectivos típicos	49
3.1.3 Modelos computacionais	50
3.2 Níveis de modelos de simulação	50
3.2.1 Modelos Geométricos	51
3.2.2 Modelos Cinemáticos	53
3.2.3 Modelos Físicos	54
3.2.4 Modelos Comportamentais	56
3.2.5 Modelos Cognitivos	57
3.3 Controladores em anel fechado	58
3.4 Agentes autónomos em ambientes reais	60
3.4.1 Controlo de velocidade de cruzeiro	61
3.4.2 Controlo de cruzeiro adaptativo	62
3.4.3 Prevenção de colisões	63
3.4.4 Veículos inteligentes	64
3.4.5 Auto-estrada automatizada	65
3.5 Agentes autónomos em ambientes virtuais	66
3.5.1 Jogos	67
3.6 Agentes autónomos em simuladores de condução	67
3.6.1 Aplicações	68
3.6.2 Aproximações existentes	70
3.6.3 Requisitos	73
3.7 Simplificação de comportamentos	77
3.8 Controlo dos agentes autónomos	83
3.8.1 Técnica da cenoura	85
3.8.2 Técnica do chicote	85
3.9 Sumário	86
4. O Simulador de Condução DriS	89
4.1 Objectivos	90
4.1.1 Avaliação do traçado	91
4.1.2 Distâncias de visibilidade	91
4.1.3 Sinalização rodoviária	91
4.1.4 Ensaio de equipamento	91
4.2 Aplicações	92
4.2.1 Detecção de movimentos relativos de veículos	92
4.2.2 Influência de painéis publicitários exteriores	94
4.2.3 Avaliação de métodos de ensino da condução	95
4.2.4 Outras aplicações	98
4.3 Arquitectura geral	98
4.4 Especificação de ambientes	100
4.5 Representação da rede viária	101

4.5.1	Polilinha.....	102
4.5.2	Estrada	104
4.5.3	Perfil de estrada	105
4.5.4	Sinalização.....	106
4.5.5	Troço de estrada	107
4.5.6	Segmento de estrada	107
4.5.7	Cruzamento.....	107
4.5.8	Árvore de Objectos.....	108
4.5.9	Movimentos	109
4.6	Posto de condução	111
4.7	Modelo do veículo	113
4.7.1	Modelo dinâmico longitudinal	114
4.7.2	Modelo cinemático	124
4.8	Seguimento do terreno	130
4.9	Síntese de imagem.....	133
4.9.1	Alargamento do campo visual	133
4.9.2	Utilização de um HMD	135
4.9.3	Melhoramentos na selecção de objectos.....	137
4.9.4	Algoritmo de selecção	140
4.10	Síntese de som.....	141
4.10.1	Arquitectura do sistema de síntese de som 3D	141
4.10.2	Processo de síntese de som 3D	142
4.10.3	Hardware de síntese de som 3D	147
4.11	Produção de relatórios	148
4.11.1	Monitorização psico-fisiológica	148
4.12	Sumário	150
5.	Veículos Autónomos no DriS	153
5.1	Arquitectura	154
5.1.1	Nível estratégico.....	155
5.1.2	Nível táctico	156
5.1.3	Nível operacional.....	179
5.1.4	Nível dinâmico	183
5.2	Variação do nível de detalhe de comportamento	183
5.2.1	Implementação	185
5.2.2	Avaliação de desempenho	187
5.3	Controlo dos agentes autónomos	194
5.3.1	Arquitectura.....	194
5.3.2	Comandos	195
5.3.3	Sensores.....	196
5.3.4	Editor interactivo	197
5.3.5	Exemplos de aplicação	198
5.4	Sumário	200

6. Conclusões e Trabalho Futuro	203
6.1 Trabalho futuro	206
7. Referências	209
Anexo A	
Matriz de Orientação	219
Anexo B	
Grafcet.....	223

Lista de Figuras

Figura 1. Arquitectura básica de um simulador de condução.....	9
Figura 2. Modelo de motor de explosão do pacote Simulink.....	14
Figura 3. Plataforma móvel utilizada para criação da sensação de aceleração.....	16
Figura 4. Exemplo de um simulador de condução com grande amplitude de movimentos	17
Figura 5. Coluna de direcção com motor acoplado	17
Figura 6. Configuração de projectores para apresentação da imagem	20
Figura 7. Apresentação das imagens reflectidas nos espelhos retrovisores utilizando monitores.....	20
Figura 8. Selecção de objectos por inclusão na pirâmide de visualização	22
Figura 9. Selecção de objectos por distância.....	22
Figura 10. Constituição de nó de variação do nível de detalhe	23
Figura 11. Hierarquia de classes Performer	27
Figura 12. Exemplo de uma base de dados Performer	27
Figura 13. Definição da geometria	27
Figura 14. Ciclo principal de uma aplicação de simulação	29
Figura 15. O simulador de condução LADS	30
Figura 16. O simulador de condução do TNO	31
Figura 17. Vista do interior do posto de condução do simulador RUG-COV.....	32
Figura 18. Vista do simulador RUG-COV em funcionamento	32
Figura 19. Vista do simulador de condução VTI em funcionamento.....	33
Figura 20. Perspectiva do que será o simulador NADS	34
Figura 21. Imagem apresentada pelo simulador de condução da UMITRI.....	35
Figura 22. O simulador de condução DRI.....	36
Figura 23. O simulador de condução de base móvel da Daimler-Benz.....	37
Figura 24. O simulador de condução de base móvel da Renault.....	38
Figura 25. Vista de um ambiente rodoviário no simulador de condução da Renault	38
Figura 26. Divisão das tarefas de condução em 3 níveis.....	43
Figura 27. Conhecimento do mundo	48
Figura 28. Níveis de modelação.....	50
Figura 29. Pêndulo simples.....	52
Figura 30. Variação do ângulo de alongamento do pêndulo ideal	52
Figura 31. Variação do ângulo de alongamento do pêndulo amortecido	53
Figura 32. Estrutura de um sistema multi-agente utilizando modelação cognitiva	57
Figura 33. Esquema de um sistema em anel fechado	58
Figura 34. Sistema em anel fechado com elemento controlador.....	59
Figura 35. Diagrama de blocos de um controlador PID.....	59
Figura 36. Respostas típicas possíveis de um sistema controlado.....	60
Figura 37. Controlador de velocidade de cruzeiro	62
Figura 38. Controlo de cruzeiro adaptativo.....	62
Figura 39. Parâmetros relevantes para o controlo longitudinal	71
Figura 40. Recta dinâmica de resposta do controlador.....	72
Figura 41. Comportamento reactivo de um veículo autónomo	75
Figura 42. Exemplo de aplicação da funcionalidade de <i>online casting</i>	76
Figura 43. Imposição de densidade de tráfego pela especificação de objectivos de grupo.....	77
Figura 44. Selecção de objectos tradicional, aplicada à síntese de imagem e à simulação	79
Figura 45. Selecção de objectos pela distância ao observador, aplicada à simulação	79
Figura 46. Efeito de uma ausência de simulação curta num pêndulo ideal.....	80
Figura 47. Efeito de uma ausência de simulação longa num pêndulo ideal.....	81
Figura 48. Efeito de uma ausência de simulação longa num pêndulo amortecido	82

Figura 49. Abordagem por múltiplos modelos.....	84
Figura 50. O exemplo clássico da técnica da cenoura.....	85
Figura 51. O exemplo clássico da técnica do chicote.....	86
Figura 52. Pavimento de asfalto.....	92
Figura 53. Pavimento de cimento.....	93
Figura 54. Pavimento com bandas cromáticas.....	93
Figura 55. Vista do ambiente virtual criado para o estudo experimental da influência de painéis publicitários exteriores.....	94
Figura 56. Vista do mesmo ambiente virtual, observando-se, ao fundo, um conjunto de painéis publicitários exteriores.....	95
Figura 57. Esquema de realização das experiências.....	96
Figura 58. Arquitectura do Simulador de Condução DriS.....	99
Figura 59. Estrutura do software do Simulador de Condução DriS.....	99
Figura 60. Arquitectura geral do simulador de condução DriS.....	100
Figura 61. Base de dados de representação do mundo virtual.....	101
Figura 62. Polilinha.....	102
Figura 63. Hierarquia das classes utilizadas para representar polilinhas.....	103
Figura 64. Organização hierárquica dos segmentos das polilinhas.....	104
Figura 65. Hierarquia das classes utilizadas para a representação da rede viária.....	104
Figura 66. Rede viária.....	105
Figura 67. Definição das posições dos separadores.....	106
Figura 68. Definição da sinalização vertical e das respectivas posições longitudinais.....	106
Figura 69. Árvore de objectos.....	108
Figura 70. Hierarquia das classes de movimento.....	109
Figura 71. Posto de condução.....	112
Figura 72. Painel de instrumentos.....	113
Figura 73. Estrutura do modelo do veículo.....	114
Figura 74. Modelo dinâmico longitudinal.....	114
Figura 75. Editor de curvas de binário - primeira versão.....	115
Figura 76. Novo editor de curvas de binário.....	118
Figura 77. Editor de curvas de resposta da embraiagem.....	119
Figura 78. Editor de curvas de binário de travagem.....	120
Figura 79. Controlo automático da caixa de velocidades.....	121
Figura 80. Resposta do módulo de controlo automático da caixa de velocidades (CACV).....	122
Figura 81. Determinação da componente do peso que influencia o movimento longitudinal.....	122
Figura 82. Situação crítica para a utilização do ângulo de inclinação frontal (γ).....	123
Figura 83. Esquema da direcção.....	124
Figura 84. Aproximação ao modelo de bicicleta.....	126
Figura 85. Editor de curvas de resposta da direcção.....	128
Figura 86. Pesquisa do terreno por 4 vectores gravíticos.....	131
Figura 87. Definição dos vectores gravíticos utilizados na pesquisa do terreno.....	132
Figura 88. Pipeline gráfica obtida pela adição de um <i>Raster Manager</i> adicional.....	133
Figura 89. Pipeline gráfica obtida pela adição de 3 <i>Raster Managers</i> adicionais.....	134
Figura 90. Configuração obtida pela adição de uma pipeline gráfica adicional.....	135
Figura 91. Esquema da ligação de um HMD, utilizando um PC para adquirir e processar a informação do sensor de orientação (<i>tracker</i>).....	136
Figura 92. Zonas de oclusão.....	138
Figura 93. Ângulos de azimuth e de elevação.....	139
Figura 94. Definição do intervalo azimuthal para um objecto composto pelos polígonos cujas normais são n_1, n_2, n_3 , e n_4	139
Figura 95. Arquitectura do sistema de síntese de som 3D.....	142
Figura 96. Processo de síntese de som 3D.....	143
Figura 97. Função de sensibilidade de um microfone virtual.....	145
Figura 98. Hardware de síntese de som por amostragem.....	147
Figura 99. Dispositivo de monitorização da posição retinal.....	149
Figura 100. Dispositivo de monitorização da actividade cerebral.....	149
Figura 101. Sincronização dos dispositivos de monitorização psico-fisiológica.....	150
Figura 102. Abordagem integrada.....	154

Figura 103. Modelo Comportamental de um veículo autónomo	154
Figura 104. Decisão táctica	156
Figura 105. Estruturação do nível táctico em módulos	157
Figura 106. Espaço das acções possíveis	158
Figura 107. Importância do período táctico	159
Figura 108. Pesquisa do valor máximo por divisões sucessivas	161
Figura 109. Saída do módulo de velocidade	162
Figura 110. Definição das posições laterais utilizadas pelo módulo de estrada	163
Figura 111. Saída do módulo de estrada	163
Figura 112. Função de qualidade resultante do módulo de saída	165
Figura 113. Exemplo da saída produzida pelo módulo de ultrapassagem	166
Figura 114. Módulo de obstáculos - primeira versão	167
Figura 115. Áreas monitorizadas pelos submódulos de obstáculos	167
Figura 116. Módulos de obstáculos - versão actual	168
Figura 117. Zona de monitorização na versão actual	168
Figura 118. Saída do módulo de obstáculos	169
Figura 119. Posição lateral relativa	169
Figura 120. Posição longitudinal relativa	170
Figura 121. Função de restrição longitudinal	171
Figura 122. Gráfico velocidade-distância com opções de desaceleração	172
Figura 123. Função de restrição lateral	176
Figura 124. Saída do módulo de monitorização de um veículo	177
Figura 125. Saída do módulo de histerese	178
Figura 126. Rede neuronal	179
Figura 127. Arquitectura do controlador longitudinal	180
Figura 128. Resposta mecânica inversa	181
Figura 129. Trajectória seleccionada	182
Figura 130. Variação do nível de detalhe comportamental com a distância	184
Figura 131. Variação da taxa de amostragem com a distância	185
Figura 132. Variação do número de amostras com a distância de visualização	186
Figura 133. Planta do circuito utilizado na experiência	187
Figura 134. Variação do número de amostras proposto com a distância, em cada ensaio	188
Figura 135. Número de amostras realizadas em cada ensaio	189
Figura 136. Área observável da estrada	190
Figura 137. Elaboração de guiões de controlo	195
Figura 138. Editor de Grafcet	197
Figura 139. Situação inicial da experiência da Ultrapassagem Concorrente	198
Figura 140. Situação crítica da Ultrapassagem Concorrente	198
Figura 141. Guião para controlar a experiência da Ultrapassagem Concorrente	199
Figura 142. Experiência de Ultrapassagem Concorrente numa estrada de três vias.	199
Figura 143. Guião para a experiência da Ultrapassagem Concorrente em 3 vias	200
Figura 144. Definição do ângulo de azimute (θ)	220
Figura 145. Definição do ângulo de inclinação frontal (γ)	220
Figura 146. Definição do ângulo de inclinação lateral (ψ)	221
Figura 147. Representação de uma etapa em Grafcet	224
Figura 148. Etapa com acções associadas	224
Figura 149. Etapa inicialmente activa	224
Figura 150. Macro etapa	224
Figura 151. Transição entre etapas	225
Figura 152. Divergência em OU	226
Figura 153. Convergência em OU	226
Figura 154. Divergência em E	227
Figura 155. Convergência em E	227

Lista de Tabelas

Tabela 1. Pistas geométricas para animação de um pêndulo simples.....	52
Tabela 2. Chaves geométricas para animação de um pêndulo amortecido.....	53
Tabela 3. Constituição dos cursos a utilizar na experiência preliminar.....	97
Tabela 4. Configurações de visualização possíveis.....	133
Tabela 5. Configurações de visualização possíveis com 2 <i>Raster Managers</i>	134
Tabela 6. Configurações de visualização possíveis com 4 <i>Raster Managers</i>	135
Tabela 7. Configurações de visualização possíveis com 2 pipelines.....	135
Tabela 8. Decisão de visibilidade.....	140
Tabela 9. Sensores implementados.....	197

Capítulo 1

Introdução

O grande número de acidentes de tráfego verificados actualmente representa um custo elevado para a sociedade, tanto em bens materiais como em vidas humanas. No sentido de diminuir estas perdas, são frequentemente dispendidas largas quantidades de recursos públicos em campanhas de sensibilização, melhoramento da legislação, aumento da vigilância e, sobretudo, aperfeiçoamento das infra-estruturas rodoviárias.

Os melhoramentos das condições de segurança de circulação de veículos passam frequentemente pela concepção, prototipagem e teste de novo equipamento. Este equipamento pode consistir em dispositivos de interacção com o condutor, sistemas de monitorização e aviso, novas infra-estruturas rodoviárias, nova sinalização, etc.

Quando os dispositivos a estudar atingem uma fase de protótipo funcional, ou as infra-estruturas rodoviárias em questão atingem um estado utilizável, é possível utilizar veículos reais, eventualmente dotados de instrumentação de monitorização apropriada, para realizar os testes julgados pertinentes. No entanto, o teste efectivo deste novo equipamento em situações críticas de segurança raramente pode ser realizado em experiências de condução no mundo real.

- A implementação real das situações de tráfego que normalmente importa estudar pode ser difícil de concretizar devido ao elevado número de veículos requerido e aos requisitos de controlabilidade de todos os elementos que compõem o tráfego ambiente.

- Determinadas situações críticas de tráfego envolvem um nível de risco elevado que desaconselha a sua implementação em condições reais.
- A implementação real de alguns dispositivos mecânicos e especialmente das infra-estruturas rodoviárias, apresenta custos muito elevados. Este facto prejudica a implementação de equipamento deste tipo com objectivos exclusivos de estudo científico e sempre que a adequação do projecto seja considerada duvidosa.

A simulação de condução apresenta-se portanto como uma alternativa válida à implementação real de situações de tráfego para a realização de experiências de condução. Para além do evidente aumento de segurança que a utilização de um simulador oferece, quando comparada com uma experiência real, a simulação de situações de tráfego permite dispor de capacidades de controlo e de monitorização inatingíveis em situações de tráfego real. Só em condições de condução simulada é possível implementar, repetidamente e de forma rigorosa, vários ensaios da mesma situação de tráfego.

Para poderem ser utilizados de forma eficiente no estudo científico de comportamento de condutores e de infra-estruturas rodoviárias, os simuladores de condução devem permitir:

- Uma disponibilização de pistas visuais, auditivas e, se possível, tácteis de elevada qualidade.
- Uma simulação correcta de sistemas físicos complexos, em tempo real.
- Uma modelação e simulação convincentes de um grande número de agentes.
- Uma produção de relatórios precisos e detalhados dos factos ocorridos.
- Uma metodologia de especificação precisa e rápida de situações de tráfego.

A satisfação de todos estes requisitos exige grandes investimentos em termos de equipamento e de desenvolvimento, o que explica a existência de um reduzido número de simuladores de condução adaptados à realização de estudos científicos. A acessibilidade a simuladores deste tipo, por parte de investigadores nacionais, é ainda dificultada pelas especificidades locais e nacionais de cada um destes sistemas. Uma vez que as normas de construção de vias rodoviárias variam em função do país ou mesmo da região, cada simulador tenta reproduzir, com a maior exactidão possível, o ambiente de condução da região em que se encontra. Por outro lado, os comportamentos dos condutores são também dependentes de variações culturais relacionadas, entre outras coisas, com o país onde vivem. Estes factos, para além de impedirem a extrapolação directa, ao nosso país, de resultados obtidos em experiências de condução realizados no estrangeiro, dificultam a utilização de outros simuladores na implementação de estudos sobre a realidade rodoviária nacional.

Uma das maiores dificuldades de utilização de simuladores de condução na realização de experiências científicas resulta da necessidade de especificação precisa das situações de tráfego a estudar. Esta especificação, normalmente realizada por especialistas de áreas muito distantes das tecnologias da informação, consiste na definição dos ambientes rodoviários, de todos os elementos que compõem o tráfego ambiente e dos seus

movimentos. Apesar de não existirem ferramentas disponíveis comercialmente que permitam especificar, de forma integrada, um ambiente de uma experiência de simulação de condução, são normalmente utilizadas diversas ferramentas e funcionalidades que reduzem o trabalho envolvido neste processo. Muito do esforço que tem sido dedicado, nos últimos anos, ao desenvolvimento de simuladores de condução destina-se, precisamente, à disponibilização de agentes autónomos de tráfego que permitam povoar, de forma rápida e intuitiva, ambientes realistas de grandes dimensões.

No entanto, é reconhecido que o aumento de autonomia dos elementos que compõem um ambiente virtual, apesar das vantagens apresentadas na especificação de ambientes de grandes dimensões, dificulta o controlo externo de cada um desses elementos. Nas aplicações que exigem um controlo preciso de alguns dos elementos autónomos, como é o caso dos simuladores de condução, a dificuldade de controlo dos modelos comportamentais é normalmente contornada pela utilização de outros agentes com menor grau de autonomia. Este tipo de solução obriga portanto ao desenvolvimento de, pelo menos, dois modelos distintos.

Por outro lado, o elevado peso computacional associado à simulação de um grande número de elementos autónomos exige a aplicação de técnicas de optimização a este processo. A técnica de optimização mais comum consiste em efectuar a simulação apenas dos objectos que se encontram mais próximos do observador. Esta selecção dos objectos a considerar no processo de simulação provoca incoerências na simulação, sobretudo a longo prazo, dificulta o processo de especificação de ambientes, obriga a desenvolvimentos adicionais destinados à geração de novos agentes e apenas permite reduções do peso computacional que são, por vezes, insuficientes. Todos estes problemas se tornam mais significativos quando se utilizam agentes com um elevado grau de autonomia.

1.1 Objectivos

Esta dissertação apresenta o trabalho realizado no âmbito do desenvolvimento de um simulador de condução destinado a aplicações científicas. Com este trabalho pretende-se obter um protótipo de um simulador de condução realista, que permita a realização de experiências científicas de avaliação de traçados rodoviários e de comportamentos de condutores. O conjunto deve ser adequado à implementação de situações típicas dos ambientes rodoviários que se encontram em Portugal.

Para facilitar as tarefas de especificação de ambientes rodoviários extensos e com grandes densidades de tráfego, a arquitectura do simulador de condução deverá permitir a inclusão de um grande número de veículos com um grau de autonomia elevado. O elevado peso computacional associado à simulação de elementos autónomos deverá ser minimizado, evitando ainda as deficiências de realismo apontadas às técnicas de optimização mais usadas.

Para possibilitar a imposição de acontecimentos de tráfego precisos, deve ser prevista uma metodologia de controlo externo dos agentes de tráfego envolvidos, de forma simples e

eficiente. Esta metodologia deve ser orientada para não especialistas em informática e permitir o desencadeamento de acções de controlo, de níveis diversos, em função de situações de tráfego determinadas.

1.2 Organização da dissertação

O capítulo 1 desta dissertação, dedicado à Introdução, inclui a secção 1.1 sobre os objectivos que presidiram à realização deste trabalho, esta descrição da organização da dissertação e a secção 1.3, onde se faz um resumo das contribuições inovadoras mais relevantes.

No capítulo 2, apresenta-se a estrutura típica de um simulador de condução e os requisitos que os diversos subsistemas que o compõem devem possuir para permitirem a sua utilização em estudos científicos de comportamentos de condutores. São também referidas as abordagens utilizadas na implementação dos subsistemas fundamentais da generalidade dos simuladores de condução que se destinam a objectivos científicos. São abordados os subsistemas de síntese de imagem, de síntese de som e a especificação dos ambientes rodoviários. Devido à relevância para o trabalho desenvolvido, as metodologias conhecidas para implementação e controlo dos elementos autónomos dos simuladores de condução são apresentadas, em separado, no capítulo 3.

O capítulo 3 é dedicado aos diversos temas relacionados com a implementação de elementos autónomos num simulador de condução. Para além das arquitecturas típicas de implementação de veículos autónomos em simuladores de condução, neste capítulo referem-se metodologias de modelação comportamental de condutores humanos, principalmente dos aspectos considerados mais relevantes para a concepção de modelos dos condutores virtuais de veículos num simulador de condução. Neste capítulo são também referidos outros trabalhos de automatização que, embora com áreas de aplicação distintas, possuem uma relação próxima com a simulação de agentes virtuais autónomos.

No capítulo 4, apresenta-se a concepção e a implementação do simulador de condução DriS. Este simulador foi concebido com uma arquitectura modular, de forma a facilitar o seu desenvolvimento por uma equipa vasta e diversificada. A apresentação do simulador DriS é também dividida pela descrição de cada uma das suas partes fundamentais, ficando a descrição dos elementos autónomos desenvolvidos e do seu controlo para o capítulo 5.

No capítulo 5, apresenta-se a arquitectura concebida para a implementação dos veículos virtuais autónomos destinados à criação de ambientes de tráfego no simulador de condução. Neste capítulo é também apresentada uma técnica inovadora de variação no nível de detalhe comportamental utilizado na simulação de elementos autónomos virtuais. A aplicação desta técnica à simulação dos veículos virtuais autónomos no simulador de condução DriS permite reduzir o peso computacional associado ao tratamento dos modelos computacionais. Esta redução é comprovada pelos resultados de uma experiência de avaliação que se encontra descrita na secção 5.2.2.

O capítulo 6 apresenta as conclusões fundamentais deste trabalho. As perspectivas de trabalho futuro e o seu enquadramento são descritas na secção 6.1.

Para além das referências bibliográficas, apresentadas no capítulo 7, esta dissertação inclui ainda, como anexos, a formulação matemática da matriz de orientação utilizada ao longo do texto e um resumo da linguagem Grafcet.

1.3 Contribuições inovadoras

O simulador de condução DriS, cujo desenvolvimento se apresenta no capítulo 4, constitui um sistema funcional que é capaz de servir de suporte à realização de estudos experimentais semelhantes aos permitidos pelos simuladores de condução científicos mais avançados em termos europeus. O processo de desenvolvimento deste simulador pode ser considerado como exemplar em termos da relação entre as funcionalidades oferecidas pelo simulador e os meios empregues no seu desenvolvimento. Para isso foi seleccionada uma arquitectura descentralizada, com a utilização preferencial de componentes de baixo custo. Todos os componentes foram desenvolvidos por uma equipa local e multidisciplinar.

Para permitir a simulação do tráfego envolvente, foi desenvolvido um condutor virtual que dirige os veículos autónomos presentes no ambiente rodoviário. Este condutor virtual é baseado em modelos comportamentais e encontra-se descrito no capítulo 5. A opção por este tipo de modelo permite, ao preparador de uma experiência de simulação, povoar ambientes rodoviários extensos, de forma simples e realista.

O modelo comportamental foi desenvolvido numa estrutura em vários níveis, onde se integram abordagens de áreas diversas, como a inteligência artificial, a psicologia, e o controlo de sistemas. Esta concepção em vários níveis permitiu a obtenção de comportamentos realistas e a aplicação de uma abordagem de implementação de controlo externo utilizando um único modelo, ao contrário do que acontece na generalidade dos outros simuladores de condução com objectivos semelhantes. Desta forma, e sem necessidade de desenvolvimentos adicionais dedicados à implementação de controlabilidade, é possível comandar cada um dos veículos autónomos por ordens de níveis diversos. Uma vez que cada veículo autónomo mantém internamente toda a sua autonomia natural, ele pode receber ordens de níveis superiores, utilizando a sua autonomia para as tentar cumprir. A tarefa de preparação de uma experiência de simulação de condução fica assim mais facilitada, uma vez que a utilização de ordens de alto nível permite a implementação de situações típicas com um menor número de ordens, e estas podem ser generalizadas a vários veículos. Esta facilidade não prejudica a controlabilidade do conjunto, uma vez que o preparador da experiência pode combinar ordens de nível superior com ordens de baixo nível, impondo acontecimentos de forma muito precisa.

Para especificar estas ordens, o preparador de uma experiência de simulação pode elaborar um guião onde impõe acções externas de controlo. Este guião pode ser elaborado numa linguagem gráfica baseada em Grafcet, com um editor próprio, ou em modo de texto,

utilizando uma linguagem estruturada, desenvolvida especialmente para o efeito. Um módulo supervisor, que se apresenta na secção 5.3, utiliza o guião e a informação recolhida do ambiente rodoviário, a partir de sensores virtuais, para controlar os veículos autónomos seleccionados.

Este modelo comportamental é optimizado com uma técnica inovadora de variação no nível de detalhe comportamental que se encontra descrita na secção 5.2. A aplicação desta técnica à simulação dos veículos virtuais autónomos no simulador de condução DriS permite reduzir significativamente o peso computacional associado ao tratamento dos modelos computacionais sem prejudicar o realismo observável nem dificultar o processo de especificação de ambientes. Esta redução pode ser comprovada por uma experiência de avaliação, descrita na secção 5.2.2, onde esta técnica foi comparada com os processos típicos disponíveis dos sistemas de simulação visual interactiva. A análise apresentada do erro médio esperado nas condições da experiência permite demonstrar ainda uma redução significativa do erro táctico observável.

Capítulo 2

Simuladores de Condução

A simulação visual interactiva realista e, em especial, a simulação da condução de veículos representam desafios aliciantes para as tecnologias actuais de realidade virtual. A construção de um simulador exige a coordenação, em tempo real, de sistemas de áreas tão distintas como:

- síntese de imagem
- modelação de grandes bases de dados de descrição de ambientes
- simulação de sistemas físicos
- processos concorrentes
- criação de som espacializado
- fornecimento de sensações tácteis.

Naturalmente, o nível de envolvimento de cada uma destas áreas e as soluções adoptadas para cada um dos subsistemas respectivos depende dos objectivos com que a simulação é realizada [Seila95]. Independentemente do facto de serem orientados para a simulação da condução de veículos terrestres ou não, os simuladores visuais podem, em função dos seus objectivos, ser classificados como simuladores lúdicos, simuladores de treino e simuladores científicos.

Os jogos de simulação têm adquirido uma importância crescente dentro do universo dos sistemas lúdicos e contribuído, de forma decisiva, para o desenvolvimento e a divulgação de muitas das tecnologias essenciais a qualquer sistema de simulação visual.

A generalidade dos sistemas de simulação lúdicos utiliza as capacidades oferecidas actualmente pelos computadores pessoais de baixo custo, para criar simulações interactivas de aspecto atraente e cativante. Graças ao hardware de síntese de imagem de baixo custo que tem vindo a ser disponibilizado nos últimos anos, é possível obter taxas de actualização de imagem da ordem dos 20 Hz, com qualidade aceitável. Para isso são muitas vezes desenvolvidos motores de simulação específicos para o caso particular da aplicação que se pretende implementar, permitindo desempenhos assinaláveis de processamento, à custa de um maior esforço de desenvolvimento e da perda de generalidade dos produtos obtidos. Esta perda de generalidade reflecte-se frequentemente na diminuição da flexibilidade oferecida, dificultando, por exemplo, a alteração do ambiente virtual de um jogo de simulação, de forma a simular outra situação pretendida.

A utilização de simuladores interactivos para fins educativos é relativamente vulgar e considerada mesmo indispensável, sobretudo quando aplicada ao treino de manuseamento de equipamentos de custo muito elevado como, por exemplo, os aviões [Balci97]. A utilização de simuladores para o ensino da condução de veículos automóveis tem sido prejudicada pelo seu alto preço, quando comparado com o custo directo da utilização de veículos automóveis. Apesar de não ser rara, a utilização de simuladores para o ensino da condução automóvel não está ainda vulgarizada. Os simuladores disponíveis para este fim apresentam normalmente limitações de realismo como o ângulo de visão reduzido, os ambientes pobres e/ou a interacção deficiente. Até há alguns anos atrás, a generalidade dos simuladores de condução com fins educativos disponíveis limitavam-se a apresentar uma sequência de imagens predefinidas, sem reacção às acções do aspirante a condutor. Simplificações ao nível do comportamento dinâmico do veículo e na reactividade dos elementos que compõem o cenário são ainda comuns na maioria dos simuladores com fins educativos actuais.

Relativamente aos jogos de simulação e aos simuladores educativos, os simuladores destinados à realização de experiências científicas requerem um maior nível de realismo, tanto em termos da simulação dinâmica como em termos de ambiente envolvente e de sensações fornecidas. No entanto, as maiores diferenças nos requisitos exigidos a estes simuladores situam-se ao nível da configurabilidade do ambiente e da demonstração de validade da simulação.

Neste capítulo abordam-se as tecnologias utilizadas em cada um dos subsistemas mais significativos de um simulador de condução, especialmente dos que se destinam à realização de experiências científicas. Para cada subsistema, serão referidos os requisitos necessários para que o componente seja integrado num simulador de condução com fins científicos, as diferenças em relação aos restantes tipos de simuladores e as estratégias de implementação conhecidas. A descrição dos agentes autónomos que possam existir nesses simuladores fica adiada para o capítulo 3, que tratará, com o pormenor justificado, das

técnicas de implementação e controlo de agentes autónomos, essencialmente em ambientes de condução simulada.

2.1 Arquitectura geral

A figura 1 apresenta a arquitectura básica de um simulador de condução interactivo. No centro arquitectónico de qualquer simulador temos uma base de dados que define o estado da simulação. No caso dos simuladores visuais, esta base de dados contém obrigatoriamente representações da geometria e das propriedades visuais dos objectos. Para além da posição central que ocupa na arquitectura de qualquer simulador, a importância fundamental deste bloco funcional no âmbito dos simuladores de condução com fins científicos, reside no facto de ser o elemento que mais frequentemente interessa alterar para implementar uma nova experiência de simulação. Na secção 2.2 serão abordados os métodos de organização e de criação destas bases de dados em simuladores de condução.

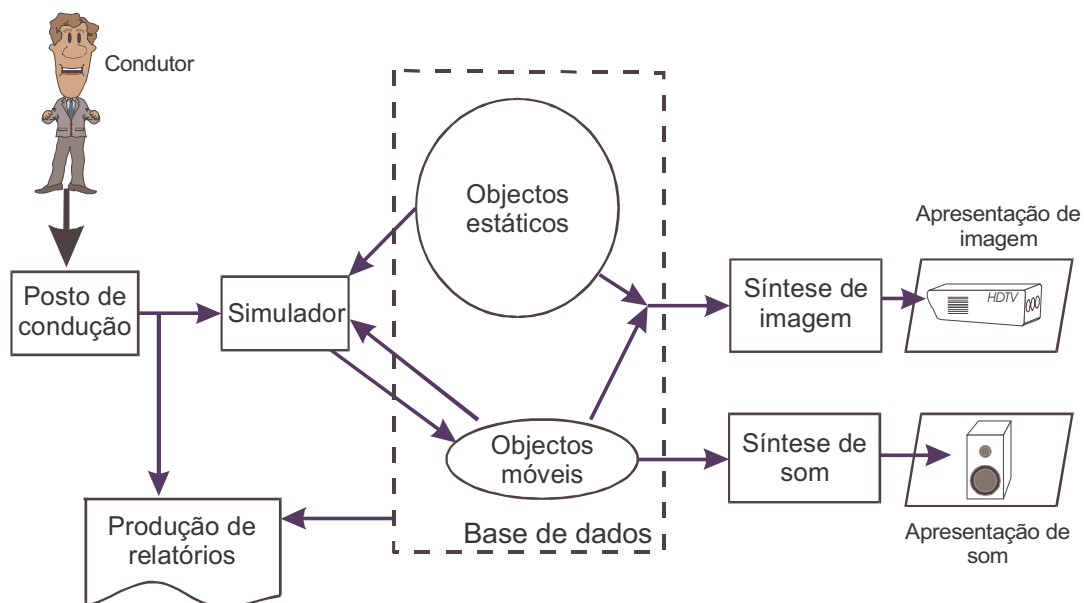


Figura 1. Arquitectura básica de um simulador de condução

Em relação estreita com a base de dados aparece o módulo simulador. Este módulo é o responsável pela actualização do estado dos objectos virtuais representados na base de dados. Esta actualização é realizada utilizando modelos que representam o comportamento dos objectos. No caso da simulação de condução, um destes modelos corresponde, necessariamente, ao comportamento dinâmico do veículo automóvel. A concepção e resolução destes modelos será o tema da secção 2.3.

O posto de condução é um dos elementos que mais influenciam o realismo global de uma simulação de condução. Na secção 2.4 apresentam-se algumas abordagens da sua implementação.

Os subsistemas de síntese de apresentação de imagem constituem normalmente duas das partes mais dispendiosas de um simulador de condução. Na secção 2.6 serão abordadas as infra-estruturas físicas utilizadas para a apresentação de imagens e as tecnologias envolvidas no processo de síntese de imagem. Será dado especial destaque a algumas técnicas conhecidas de aceleração da síntese de imagem em tempo real, uma vez que estas servem também de filosofia base para a implementação das técnicas de aceleração da simulação comportamental apresentadas nos capítulos seguintes.

Os requisitos exigidos e as técnicas utilizadas na concepção do processo de síntese de som e os equipamentos utilizados para a sua apresentação serão abordados na secção 2.5.

2.2 Definição de cenários

A definição e a manutenção de ambientes complexos para aplicações de visualização interactiva são tarefas trabalhosas que requerem uma grande dedicação do preparador da experiência. As dificuldades são devidas não só à enorme quantidade de objectos elementares que é necessária para preencher de forma realista um ambiente, mas também às imposições de compatibilidade do modelo obtido com os sistemas de simulação e visualização a que se destinam.

Um modelo de um ambiente virtual com alguma complexidade pode facilmente atingir um número de polígonos que torna impraticável qualquer tentativa de o especificar de forma manual. Para isso usam-se normalmente ferramentas de modelação que, apesar de permitirem uma redução drástica do esforço necessário, não impedem que o processo de modelação seja considerado como trabalhoso.

Esta grande quantidade de trabalho pode ser aliviada se o objectivo for a criação de um ambiente completamente imaginário, onde não existem requisitos de semelhança com objectos ou ambientes conhecidos. Por outro lado, o trabalho pode ser agravado se o objectivo for a criação de um ambiente com muitas semelhanças com os ambientes reais (típicos ou específicos). Este agravamento em termos de esforço necessário torna-se ainda mais significativo quando as exigências de semelhança se aplicam para além do aspecto visual, e adquirem um carácter fundamental e rigoroso ao nível físico, como acontece normalmente nos simuladores de condução destinados a estudos científicos.

Um simulador de condução requer a preparação de bases de dados com a descrição de cenas de regiões geograficamente extensas, com estradas correctamente modeladas em função das normas e tradições do país que se pretende simular. Esta especificidade de ambientes dificulta o aproveitamento de desenvolvimentos realizados noutros países, mesmo quando os problemas de compatibilidade técnica se apresentem superáveis.

A forma como se organizam os diversos componentes de uma cena é também uma questão importante. Como será descrito na secção 2.6, o desempenho dos sistemas de síntese de imagem pode ser drasticamente afectado pela qualidade da representação e organização dos ambientes modelados.

Actualmente existem já diversos pacotes completos de modelador, formato de ficheiro e visualizador, que oferecem total compatibilidade ao nível da informação geométrica e visual. Existem também alguns formatos que se tornaram normas ao nível da especificação de ambientes e que são frequentemente suportados tanto por ferramentas de modelação genéricas como por visualizadores interactivos. Exemplos significativos destes formatos são o VRML, que será abordado na secção 2.7, e o *OpenFlight* [MultiGen98]. No entanto, a opção por estes pacotes não resolve completamente os problemas de modelação e representação dos ambientes rodoviários envolvidos na simulação de condução.

Para além dos problemas de compatibilidade com o sistema de simulação e visualização que aparecem associados à informação geométrica do ambiente utilizado, sempre que se deseje incluir participantes autónomos virtuais ou avaliar desempenhos de participantes humanos, é fundamental que outros níveis de informação coexistam com a informação geométrica. A criação e a manutenção destes diversos níveis de informação, fundamentais para a implementação de simulações visuais interactivas, é um problema ainda mais complexo, tanto mais que não existem actualmente normas suportadas de armazenamento e tratamento integrado destes conjuntos relacionados de informações.

É vulgar encontrar, nos simuladores de condução destinados a estudo científico, duas bases de dados distintas mas correlacionadas para especificar um mesmo cenário. Uma destas bases de dados destina-se unicamente ao processo de visualização e contém as representações geométricas dos objectos e as suas propriedades visuais. Para a implementação desta base de dados utiliza-se frequentemente um dos formatos de modelação conhecidos que permitem uma organização optimizada para a visualização em tempo real.

A outra base de dados contém informação lógica vectorial que facilita a consulta, em tempo real, do ambiente rodoviário. Esta base de dados inclui normalmente representações de alto nível da rede viária, dos veículos, da sinalização e de todos os outros elementos cuja consulta rápida é importante para a simulação e o controlo dos cenários.

Alguns simuladores utilizam ainda uma terceira base de dados especificamente para a descrição do terreno [Cremer96]. A utilização desta representação independente pode ser justificada pela necessidade de utilização de formatos específicos para optimização dinâmica do nível de detalhe geométrico do terreno, tendo em vista a aceleração tanto do processo de visualização como da determinação de colisões.

Esta necessidade de coexistência de várias representações distintas do mesmo mundo simulado constitui uma das maiores dificuldades existentes na criação de ambientes rodoviários virtuais para os simuladores de condução. Apesar de existirem formatos de representação de elementos gráficos tridimensionais que permitem a associação de propriedades adicionais aos objectos gráficos, não existem ainda ferramentas de modelação comerciais que permitam gerar, de forma simples e amigável, as diversas representações do ambiente rodoviário da forma requerida pelos simuladores de condução. Por outro lado, a simples associação de propriedades lógicas e geométricas aos elementos gráficos não resolve o problema de forma directa, pois as restrições temporais e os diferentes tipos de

acesso a que as duas representações vão estar sujeitas implicam a coexistência de organizações e hierarquias completamente distintas. Para além disso, é fundamental que as diversas representações sejam completamente compatíveis e que esta compatibilidade seja mantida durante toda a simulação.

O conhecido software comercial de modelação de ambientes virtuais destinados a aplicações de tempo real *Multigen Creator* [MultiGen99] disponibiliza, em opção, um conjunto de ferramentas adicionais específicas para a modelação de estradas e ambientes rodoviários. Este conjunto de ferramentas é baseado em software desenvolvido no âmbito de um simulador de condução construído na Universidade de Iowa (ver secção 2.8.5). No entanto, é reconhecido que a preparação de ambientes para simuladores de condução possui requisitos específicos, que não podem ser completamente satisfeitos por este ou outro software comercial disponível.

Um conjunto de ferramentas de modelação desenvolvidas especificamente para aplicações de simulação de condução pode ser encontrada em [Wolffelaar99]. Estas ferramentas permitem o tratamento integrado dos diversos tipos de informação necessários a um simulador de condução, através de linguagens estruturadas desenvolvidas para o efeito. Estas linguagens incluem muitas das funcionalidades oferecidas pelas vulgares linguagens de programação de alto nível, tais como a definição de variáveis, de funções e de estruturas de blocos. O preparador de uma experiência de simulação de condução pode utilizar estas ferramentas em conjunto com um vulgar editor de texto para especificar o ambiente de simulação. Um compilador, também desenvolvido especialmente para o mesmo fim, encarrega-se depois de transformar a informação para os formatos requeridos pelo simulador.

Independentemente do formato utilizado para descrever o cenário virtual a utilizar na simulação, toda a informação é carregada para a memória da máquina que implementa a simulação. As estruturas de memória utilizadas para este efeito podem variar muito. No entanto, a generalidade dos simuladores visuais existentes actualmente utiliza estruturas definidas por pacotes de desenvolvimento standarizados como o *OpenGL* que será referido na secção 2.7.2 ou, mais frequentemente, o *Performer*, cuja breve descrição pode ser encontrada na secção 2.7.3.

Para além da modelação do cenário, a preparação de ambientes de simulação de condução requer também a criação de actores e a especificação dos guiões respectivos. Estas questões serão abordadas no capítulo 3.

2.3 Modelo dinâmico

Uma simulação de condução requer o uso do modelo dinâmico do veículo simulado. No caso de se pretender obter uma condução simulada realista, este modelo deve ser completo, detalhado e resolvido com precisão. Por outro lado, para poder ser utilizado num simulador de condução interactivo, o modelo deve poder ser resolvido em tempo real, o que limita a

complexidade do modelo. Estes dois requisitos, realismo e resposta rápida, são normalmente difíceis de conciliar.

Um modelo completo de um veículo automóvel pode ser dividido em duas partes distintas. A primeira é composta pelo chassis do veículo, as suspensões, as rodas e os pneus, e pode ser modelada como um conjunto de múltiplas partículas. Desta forma, os movimentos do veículo são definidos a partir das forças que actuam em cada um dos elementos: forças de tracção, binários, forças de contacto com o solo, forças aerodinâmicas, pesos, etc. A segunda parte do veículo corresponde a todos os componentes que são necessários para movimentar e controlar o veículo: o motor, a embraiagem, a caixa de velocidades, a cadeia de transmissão, os travões, o sistema de direcção, etc. Nos veículos modernos são também encontrados outros elementos cuja modelação pode ser importante, como os sistemas anti-bloqueio das rodas (ABS), controladores automáticos de caixa de velocidades, controladores de velocidade de cruzeiro, etc.

A determinação em tempo real da resposta da parte que trata dos diversos corpos rígidos do veículo é muito complexa, devido à natureza não linear das equações de movimento envolvidas. Para além disso, as suspensões dos veículos incluem componentes elásticos na maioria dos pontos de contacto dos elementos da suspensão e do chassis. Estes componentes têm grande influência no comportamento final do veículo, especialmente em curva, pelo que devem ser considerados no modelo sempre que for requerida uma simulação correcta. A modelação da elasticidade e das forças de atrito associadas a todos estes elementos torna as equações diferenciais do movimento ainda mais complexas, prejudicando assim os tempos de integração.

O requisito de obtenção de respostas em tempo real impõe quase sempre a utilização de métodos de integração de período fixo, de forma a assegurar um tempo de processamento constante por cada ciclo de resolução. O período de integração utilizado normalmente na simulação de sistemas de múltiplos corpos em tempo real é da ordem dos 0.01 segundos. No entanto, a presença de elementos complexos como os contactos elásticos, obriga por vezes à utilização de integrações especiais para algumas partes do sistema, com períodos de integração da ordem dos 10^{-4} ou 10^{-5} segundos [Acevedo96]. Isto obriga à realização de centenas ou milhares de avaliações por cada período de integração efectivo de 0.01 segundos, aumentando muito o esforço de processamento necessário.

A modelação correcta dos restantes elementos mecânicos (motor, transmissão, travões, etc.) é também um problema complexo, mesmo quando considerado de forma isolada. No entanto, para efeitos de simulação de condução, é normalmente suficiente considerar, para cada um dos componentes, um modelo simplificado, desde que devidamente validado. Estas simplificações permitem a resolução do modelo mecânico do veículo em tempo real, sem perda significativa do realismo perceptível para o condutor.

Dada a complexidade mecânica dos motores utilizados actualmente nos veículos automóveis, a concepção de um modelo capaz de reproduzir fielmente a resposta de um destes sistemas seria um projecto, só por si, complexo. A resolução de um modelo que considere todos os fenómenos físicos que se passam dentro de um motor e nos restantes

componentes mecânicos de um automóvel durante o seu funcionamento normal seria portanto difícil de ser efectuada em tempo real.

A utilização de modelos rigorosos justifica-se por vezes em simulações com objectivos de estudo de comportamento dinâmico. Na generalidade destes casos, não é fundamental que a simulação decorra em tempo real, pelo que todo o empenho é colocado no rigor físico. Em [Pruckner97] apresenta-se um exemplo de um estudo de um dispositivo de controlo dinâmico de veículos realizado em simulação, utilizando um modelo dinâmico de um veículo automóvel com 81 graus de liberdade. Neste modelo, o motor é, no entanto, simulado a partir de um modelo relativamente simples, uma vez que o seu funcionamento não é considerado relevante para os ensaios que se pretende realizar.

Pelo contrário, em [Yanakiev95] apresenta-se um modelo complexo de um motor diesel com compressor turbo que considera parâmetros como as pressões, as velocidades e as temperaturas dos gases nos diversos pontos do percurso de funcionamento, os rendimentos das turbinas e de outros elementos mecânicos internos. Este modelo é depois utilizado em conjunto com um modelo simplificado de comportamento longitudinal de veículos pesados para o ensaio de sistemas automatizados de controlo de pelotões¹.

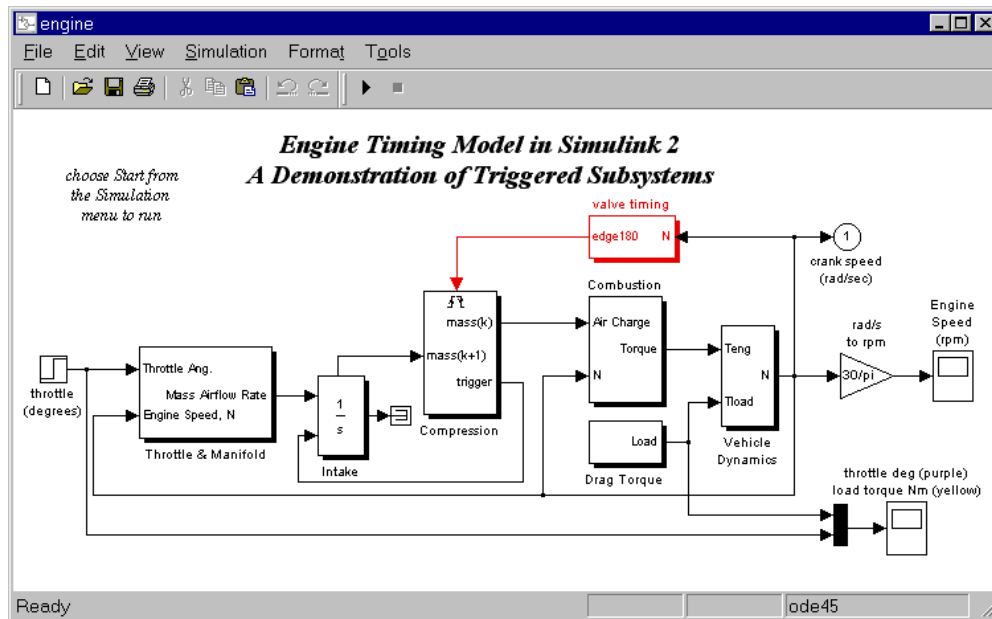


Figura 2. Modelo de motor de explosão do pacote Simulink

Apesar de não poderem ser utilizados directamente nos simuladores de condução interactivos, estes modelos rigorosos apresentam uma grande utilidade no âmbito do teste e da validação dos modelos mais simplificados. A utilização destes modelos durante o

¹ Por pelotão designa-se um conjunto de veículos que circulam no mesmo sentido e pela mesma via, suficientemente juntos para que as suas velocidades sejam condicionadas pelas dos veículos antecessores.

desenvolvimento e a validação de um simulador de condução permite por vezes evitar o recurso a ensaios de campo com veículos reais instrumentados.

Um modelo mais simplificado de um motor de explosão pode ser encontrado no CD de demonstração do conhecido pacote de simulação Simulink. Este modelo (figura 2) destina-se a implementar uma simulação de baixo nível, tendo em conta diversos fenómenos físicos que se verificam nos motores de explosão. Não é adequado à utilização num simulador de condução uma vez que é demasiado pesado e a existência de um número tão elevado de parâmetros dificulta a especificação de comportamentos dinâmicos por não especialistas.

2.4 Posto de condução

Num simulador de condução, o contacto entre o condutor humano e o ambiente virtual é implementado pelo conjunto da imagem apresentada e pelo posto de condução. Este elemento é portanto fundamental para o realismo da simulação.

A solução típica de implementação do posto de condução consiste na instrumentalização de todo o equipamento de condução de um veículo real. Os pedais, o volante e a alavanca da caixa de velocidades são apetrechados com sensores eléctricos que permitem conhecer de forma rigorosa o seu posicionamento. Os mostradores do painel de instrumentos são controlados artificialmente de modo a que reproduzam os acontecimentos do mundo simulado.

Dependendo dos casos, o veículo pode ser mantido com todos os seus componentes ou pode ser desprovido dos elementos mecânicos não fundamentais para o funcionamento simulado. O motor e as rodas são alguns dos componentes mecânicos normalmente eliminados dos veículos utilizados para a implementação do posto de condução de um simulador. Por vezes, o veículo é cortado e é eliminada a parte traseira que não é visível pelo condutor. Esta solução permite reduzir o espaço ocupado e o peso do conjunto.

Nos protótipos de simuladores de condução mais simples, é utilizado apenas um conjunto de pedais e volante semelhante aos vulgarmente disponíveis para jogos de condução. Nestes casos, os mostradores do painel de instrumentos podem ser sintetizados num monitor de um computador.

Na maioria dos simuladores de condução destinados à realização de estudos científicos, o corpo do veículo é mantido fixo. No entanto, para fornecer ao condutor a sensação completa de movimento, alguns simuladores permitem movimentar o utilizador, emulando assim as forças de aceleração

2.4.1 Sensação de aceleração

Devido ao elevado custo adicional que requer, a criação da sensação de aceleração é aplicada apenas numa minoria dos simuladores de condução existentes. Estes simuladores utilizam normalmente uma plataforma hidráulica com 6 graus de liberdade, sobre a qual é montada a cabina do veículo [Cremer96], conforme se apresenta na figura 3.

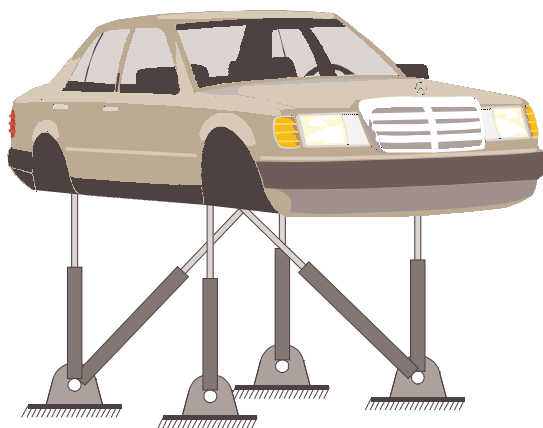


Figura 3. Plataforma móvel utilizada para criação da sensação de aceleração

As acelerações determinadas pela resolução do modelo dinâmico do veículo são utilizadas para comandar a plataforma móvel. A frequência com que a posição desta plataforma é actualizada anda normalmente entre os 3 e os 6 Hz, sendo portanto inferior à frequência de actualização da imagem. Este tipo de plataformas é eficiente na simulação precisa de impulsos de aceleração de pequena duração, podendo atingir acelerações instantâneas da ordem de 1G. No entanto, devido ao seu curso reduzido, as plataformas deste tipo apresentam dificuldades na simulação das acelerações que se mantêm durante um longo período de tempo e que são frequentes nos veículos automóveis terrestres.

Uma técnica comum para ultrapassar esta limitação consiste na alteração dos ângulos de inclinação frontal e lateral de forma a aproveitar a força de gravidade para simular as forças de aceleração mais longas. A aplicação desta técnica é frequente nos sistemas de simulação não interactiva baseados em plataformas deste tipo. No entanto, a determinação dos movimentos a imprimir ao posto de condução para simular as forças de aceleração é um problema muito mais complexo em simulações interactivas do que nas simulações não interactivas. Nos sistemas interactivos, para além da necessidade de obter, em tempo real, os comandos dos elementos mecânicos que movimentam a plataforma, existem dificuldades acrescidas devido à imprevisibilidade dos acontecimentos futuros. Nos sistemas não interactivos, os percursos podem ser conhecidos com antecedência, pelo que é possível ajustar os movimentos da plataforma de forma a reproduzir, o melhor possível, as acelerações correspondentes. Num sistema interactivo, não é possível saber qual o movimento seguinte, pelo que existe a preocupação constante de tentar manter a plataforma móvel longe dos limites de deslocamento de forma a possibilitar a reacção adequada a qualquer aceleração que possa surgir.

Os simuladores mais avançados utilizam uma plataforma do tipo da apresentada na figura 4 montada sobre carris de forma a aumentar a amplitude dos movimentos permitidos, pelo menos numa direcção. Esta facilidade permite a simulação mais correcta de pequenas acelerações durante períodos de tempo mais longos.

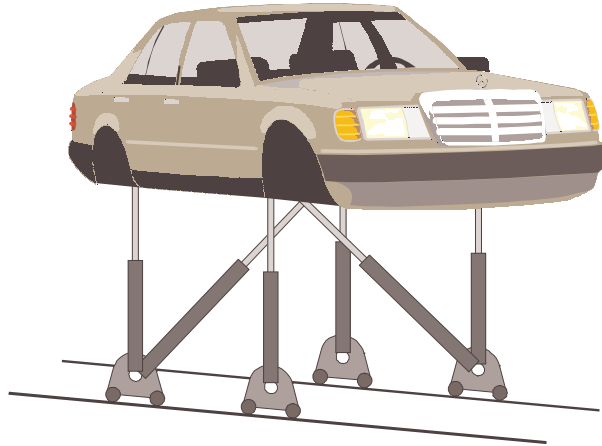


Figura 4. Exemplo de um simulador de condução com grande amplitude de movimentos

2.4.2 Sensação de força no volante

Uma das informações mais importantes utilizada por um condutor de um veículo automóvel é a força sentida no volante. Esta força pode transmitir ao condutor informações sobre a violência da curva que está a descrever, a irregularidade do piso, a existência de uma avaria numa das rodas (como por exemplo um furo), etc.

É portanto importante que um simulador de condução realista permita fornecer ao condutor a sensação de força no volante. Esta necessidade é também apontada nos jogos de simulação de condução, onde é já resolvida mesmo com equipamento de baixo custo.

A apresentação de forças no volante é conseguida pela acoplamento mecânico de um motor ao eixo do volante, conforme se esquematiza na figura 5.

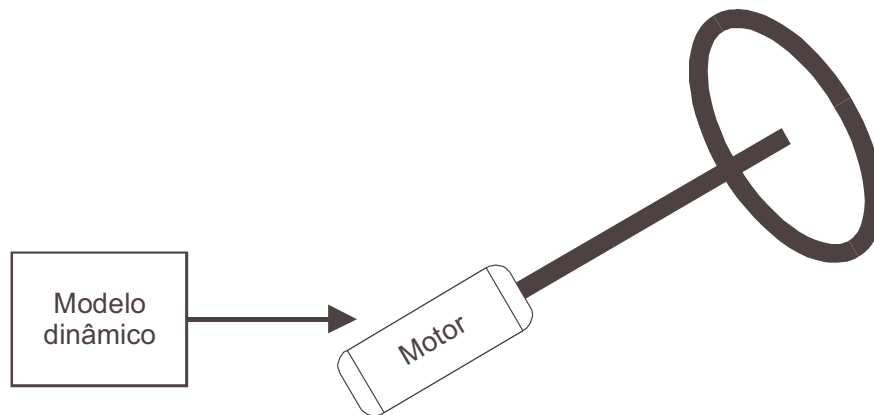


Figura 5. Coluna de direcção com motor acoplado

Este motor é accionado a partir da informação recebida da resolução do modelo dinâmico do veículo. Como será apresentado na secção 4.7, a força de fricção entre as rodas da frente e o solo é um dos parâmetros determinados durante a resolução do modelo. Da soma destas forças pode ser determinado o binário aplicado à coluna de direcção.

Acompanhando as simplificações aplicadas aos modelos dinâmicos utilizados, a generalidade dos jogos de simulação de condução apresentam uma força no volante que é seleccionada em tempo real de um conjunto de padrões predefinidos. Estes padrões correspondem a definições da evolução temporal do valor da força aplicada no volante durante um determinado período (normalmente alguns segundos). Cada padrão é associado a um evento e accionado no momento correspondente. A força resultante do movimento em curva é simulada de forma fixa, tendo em conta apenas o ângulo de viragem, e eventualmente, também o valor da velocidade.

O sistema de fornecimento de força no volante dos simuladores de condução científicos é também por vezes utilizado para a implementação de protótipos de sistemas de alerta e aviso ao condutor. São conhecidos estudos de sistemas que produzem vibrações no volante para alertar o condutor da existência de uma situação de risco.

2.5 Síntese de som

A apresentação de pistas sonoras é reconhecidamente importante para o aumento da sensação de imersão de qualquer simulação interactiva. Esta sensação é ainda mais ampliada quando as pistas auditivas são fornecidas de forma espacializada. Para isso, é necessária a utilização de várias fontes de som colocadas em locais diversos.

O som espacializado é modulado em direcção e volume para indicar a localização e a distância do som no mundo virtual.

Nos simuladores visuais interactivos é vulgar a implementação de sons contínuos e de sons accionados por eventos. Nos sons contínuos incluem-se os ruídos devidos ao funcionamento dos veículos, sons ambiente, etc. Estes sons existem normalmente durante períodos longos de tempo, embora possam ser eventualmente ligados e desligados pelo simulador. Enquanto se encontram ligados, o sistema de síntese de som deve ir recebendo, de forma mais ou menos contínua, as actualizações das posições de cada uma das fontes virtuais de sons deste tipo. Nos sistemas mais completos admite-se ainda a alteração de forma contínua de alguns parâmetros dos sons associados às fontes sonoras. Desta forma é possível reproduzir as variações do ruído de um motor, devidas, por exemplo, à sua velocidade de rotação e ao binário fornecido.

Os sons accionados por eventos destinam-se a implementar ruídos como o gerado por uma colisão, ou outro acontecimento. Sempre que recebe uma ordem para produzir um som deste tipo, o sistema de síntese de som realiza a espacialização do som respectivo até que ele termine.

2.6 Síntese de imagem

Devido ao papel dominante da visão na maioria das tarefas realizadas por humanos, os estímulos visuais são fundamentais para a criação da sensação de presença num ambiente

virtual. Estes estímulos são os grandes responsáveis pela sensação de inclusão e pela percepção de profundidade.

A simulação realista de condução requer por vezes a utilização de cenas extensas de grande complexidade. A possibilidade de visualização em tempo real destas bases de dados geométricos, tão complexas, sempre foi um desafio para a computação gráfica. O seu tratamento requer a implementação de algoritmos de cálculo de visibilidade, nomeadamente de Z-buffer.

Cenas de grandes dimensões, compostas por objectos 3D complexos podem facilmente sobrecarregar até os sistemas mais poderosos de síntese de imagem assistidos por hardware, comprometendo as taxas de refrescamento exigidas pelas aplicações interactivas de simulação visual. Para ultrapassar estas limitações, são utilizadas diversas técnicas, muitas das quais são já consideradas como padrão em virtude da sua vulgarização [Foley90].

Os simuladores visuais construídos na década de 70 baseavam-se em modelos de materiais rígidos, e utilizavam câmaras de vídeo em circuito fechado para gerar as imagens apresentadas aos utilizadores [Vince93]. Só na década de 80 os simuladores visuais adoptaram a tecnologia de geração de imagens em tempo real, a partir da descrição digital de cenas tridimensionais. Os primeiros destes sistemas apenas permitiam um nível de detalhe muito inferior ao que era conseguido com a filmagem directa de um modelo rígido. No entanto, a natureza virtual do modelo 3D digital depressa permitiu demonstrar os enormes benefícios das imagens sintetizadas por computador, graças à maior versatilidade e aos modos de interacção admitidos. A utilização de modelos digitais permitiu a introdução de objectos móveis na cena, o controlo da meteorologia e da iluminação. O maior nível de interacção, proporcionado pelas imagens geradas por computador, tornou possível a aplicação dos simuladores visuais a áreas que requerem grande interactividade, como a simulação da condução de veículos terrestres.

Também durante os anos 80 se observou uma evolução dos dispositivos de visualização. Os monitores ou grupos de monitores tipo CRT, utilizados até então nos simuladores visuais, foram sendo substituídos por projectores de vídeo de elevada resolução, com ecrãs mais ou menos panorâmicos. Nos últimos anos, tem-se observado o aumento da utilização de dispositivos de visualização de montagem na cabeça (HMD) em sistemas de simulação visual. Estes dispositivos, com a adaptação de sensores de posição, permitem um nível de interacção e uma liberdade muito superiores.

A generalidade dos simuladores de condução destinados a utilização científica utilizam conjuntos de projectores e ecrãs para a apresentação da imagem panorâmica ao condutor. Normalmente são utilizados três projectores para apresentar a imagem da frente, conforme se ilustra na figura seguinte. Obtêm-se assim ângulos de visualização horizontal entre 120° e 190° e resoluções que vão desde os 1500x500 até aos 3820x1024 pontos de imagem.

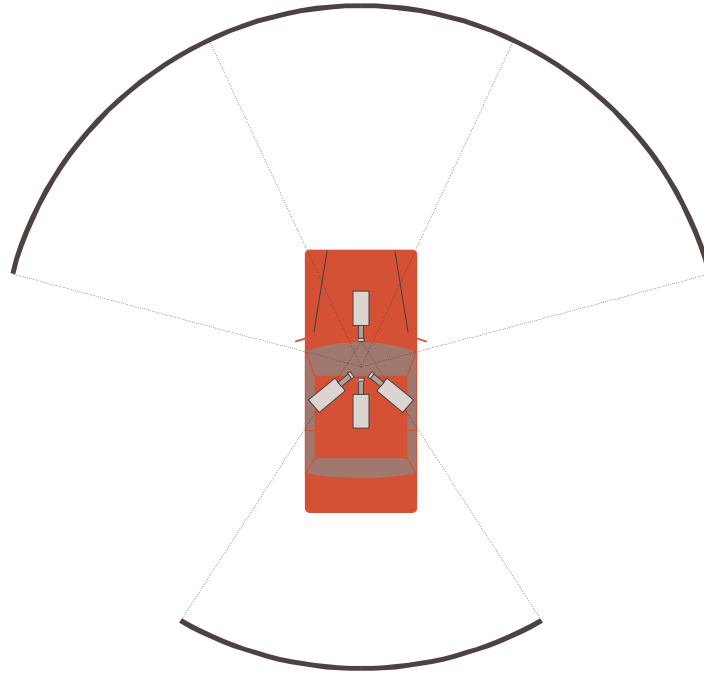


Figura 6. Configuração de projectores para apresentação da imagem

Para a apresentação das imagens reflectidas nos espelhos retrovisores, as soluções variam entre a utilização de projectores adicionais (figura 6) e a utilização de monitores (um para cada retrovisor) estrategicamente colocados, conforme se mostra na figura 7.

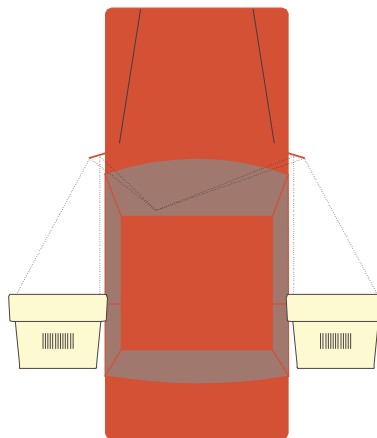


Figura 7. Apresentação das imagens reflectidas nos espelhos retrovisores utilizando monitores

Recentemente, foram ensaiadas algumas arquitecturas que utilizam HMDs para apresentação da imagem ao condutor [Levine95]. No entanto, devido à resolução ainda inferior que é possível obter com estes dispositivos, e ao comportamento anti-natural que implicam, os HMDs não são por enquanto utilizados com frequência nas experiências de simulação de condução.

Uma análise dos requisitos colocados às imagens utilizadas nos simuladores visuais interactivos pode ser encontrada em [Padmos92]. Aí são sugeridos alguns parâmetros para os sistemas de apresentação de imagem dos simuladores visuais interactivos, em função da aplicação a que destinam. Termina apontando a necessidade de realização de um estudo mais aprofundado sobre a influência das pistas visuais na realização de tarefas específicas nos simuladores.

Em [Blackham99] é apresentada uma excelente discussão das actuais tecnologias disponíveis para a apresentação de imagens em simuladores de condução. É ainda sugerida uma configuração inovadora de projectores e ecrãs com o objectivo de facilitar a implementação de ecrãs com campo visual largo, de forma compacta e económica.

Actualmente, na maioria dos simuladores visuais e na generalidade dos simuladores de condução, utiliza-se, para a síntese de imagem, equipamento dedicado de elevado desempenho. Os exemplos mais significativos de equipamentos deste tipo em simuladores de condução são o Evans & Suntherland, sobretudo da série ESIG, e a família Silicon Graphics Onyx ou Onyx2, com *pipelines* gráficas RealityEngine [Akeley93] ou InfiniteReality [Montrym97]. Nestes casos é vulgar a utilização de programação em GL (ver secção 2.7.2), ou, no caso dos mais recentes, em *Performer* (ver secção 2.7.3).

A resolução das imagens sintetizadas que são usadas nos simuladores de condução actuais é sempre inferior à correspondente à observação directa do mundo real. Esta deficiência na qualidade das imagens provoca um comportamento de condução diferente, devido, por exemplo, à dificuldade na percepção de obstáculos. É possível demonstrar que, numa situação de aproximação a um obstáculo, um condutor trava mais cedo quando conduz num simulador de condução do que num veículo real [Rogers88]. Esta constatação de deficiência das imagens apresentadas, assim como outras que poderiam ser feitas relativamente a outros aspectos dos simuladores de condução, não prejudica, no entanto, a validade dos resultados dos estudos realizados em simuladores de condução.

2.6.1 Organização e selecção de objectos

A base de dados de representações visuais de objectos está normalmente organizada hierarquicamente numa árvore, com um volume envolvente associado a cada nó. Esta árvore pode ser herdada do processo de modelação ou pode ser criada por optimizadores de cenário que agrupam os polígonos ou grupos tendo em conta a sua localização espacial. Muitas técnicas utilizadas em diversos algoritmos de síntese de imagem tiram partido desta organização hierárquica da base de dados da cena.

A selecção hierárquica de objectos por teste de inclusão na pirâmide de visualização é uma destas técnicas. Os volumes de inclusão dos objectos são hierarquicamente testados contra a pirâmide de visualização e apenas aqueles que forem considerados como estando incluídos são admitidos para a fase seguinte do processo de síntese, conforme se apresenta na figura 8. A pirâmide de visualização é definida como aquela cujo vértice se encontra no ponto de visualização e cujas superfícies laterais incluem os limites do ecrã. Para

simplificar o processo de selecção e acelerar a síntese de imagem, é prática corrente a não aplicação desta técnica de selecção aos ramos mais reduzidos da árvore de objectos, por conterem um número reduzido de polígonos.

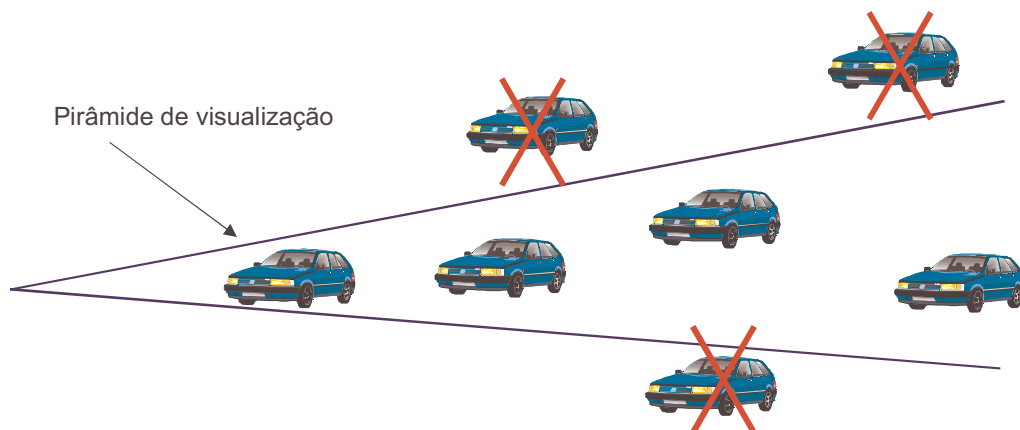


Figura 8. Selecção de objectos por inclusão na pirâmide de visualização

A eliminação de objectos com base na distância para o ponto de observação (figura 9) é também uma técnica utilizada com frequência. No entanto, a aplicação apenas desta técnica pode ser considerada pouco eficiente, por provocar a eliminação de objectos que, apesar de distantes, possam grandes dimensões e por isso sejam importantes para a imagem sintetizada.

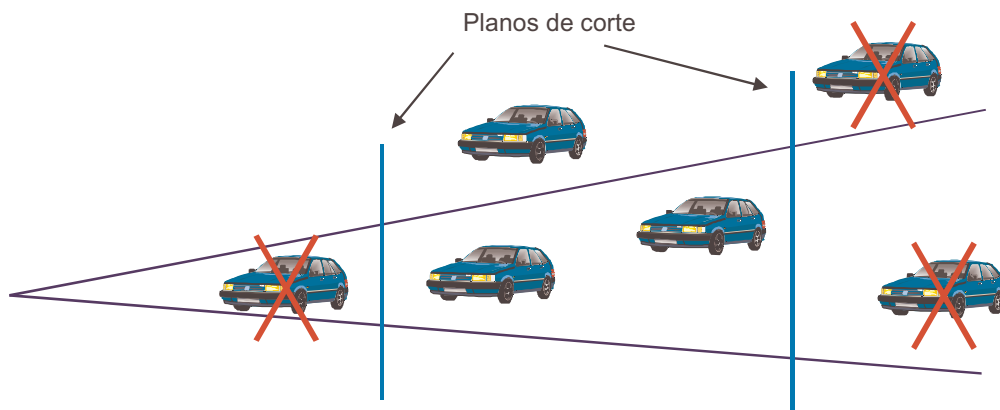


Figura 9. Selecção de objectos por distância

2.6.2 Nível de detalhe

Cenas de grandes dimensões, compostas por objectos 3D complexos podem facilmente sobrecarregar até os sistemas mais poderosos de síntese de imagem assistidos por hardware, comprometendo as taxas de refrescamento exigidas pelas aplicações interactivas de simulação visual.

Uma das técnicas de aceleração utilizadas nos sistemas de síntese de imagem com mais sucesso é a selecção automática do nível de detalhe dos objectos. Para isso, os objectos (normalmente representados por malhas poligonais) são definidos em múltiplos níveis de detalhe, com um número de polígonos decrescente. Cada nível de detalhe é representado na árvore de objectos por um nó independente, filho de um nó de selecção do nível de detalhe (LOD), como se pode observar na figura 10. Em tempo real, durante a simulação, é seleccionado o nível de detalhe apropriado, de forma a manter a qualidade de imagem e a evitar a sobrecarga do sistema de síntese de imagem. Esta selecção é realizada tendo em conta a distância para o ponto de observação, a resolução final pretendida e um factor de escala seleccionado.

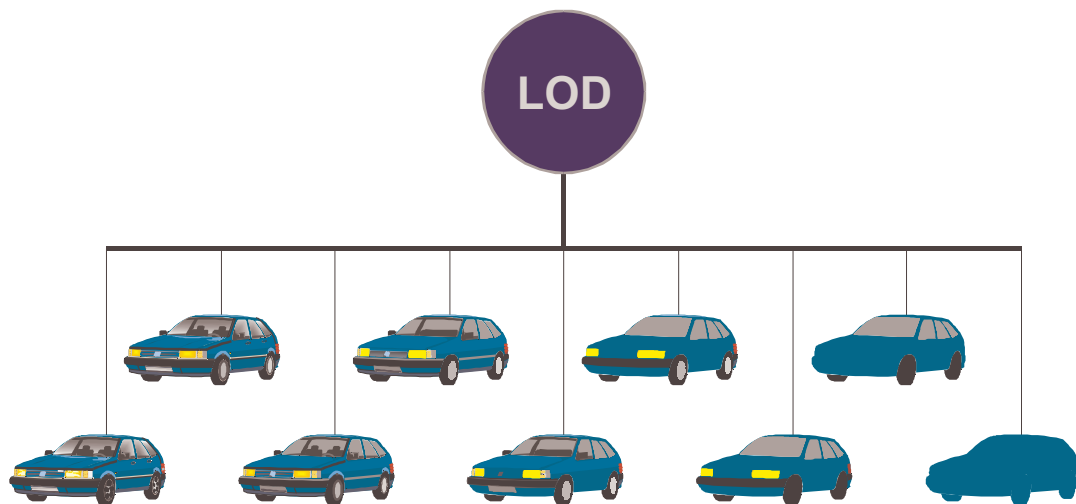


Figura 10. Constituição de nó de variação do nível de detalhe

A utilização desta técnica permite normalmente um melhoramento significativo no tempo de geração de imagem, mas requer a disponibilização de diversas representações, com complexidades diferentes, para cada objecto. Essas representações podem ser criadas durante a fase de modelação. Contudo, a criação manual de vários níveis de detalhe para objectos complexos é normalmente um trabalho árduo e pouco eficiente. É portanto fundamental a utilização de ferramentas que permitam a geração automática das diferentes representações [Krus99]. Existem também abordagens que tentam obter em tempo real a representação a utilizar na geração de imagem [Gobbetti99].

A técnica da variação do nível de detalhe pode ser aplicada a qualquer nível hierárquico da base de dados de objectos. Uma aplicação a baixo nível corresponde normalmente à redução do detalhe geométrico com que um objecto elementar é definido. Uma aplicação a um nível mais elevado pode ser a redução de objectos elementares com que um objecto complexo é detalhado.

Uma utilização eficiente da técnica de variação do nível de detalhe pode exigir a sua aplicação a vários níveis [Mason97]. Por exemplo, uma folha de uma árvore é um pequeno objecto que, para distâncias significativas, pode ser substituído por um simples polígono.

No entanto, um conjunto numeroso destes objectos como uma copa de uma árvore pode ser substituído, com lucro significativo, por uma representação ainda mais simples do que um conjunto de muitas folhas simplificadas. Para distâncias ainda maiores, pode ser razoável eliminar completamente uma folha isolada. Todavia, a aplicação desta eliminação a cada uma das folhas de um conjunto numeroso como uma copa, pode provocar o desaparecimento de uma floresta inteira, o que poderia por sua vez afectar uma percentagem significativa da área visível.

É portanto desejável que objectos complexos, como a copa ou mesmo a floresta, sejam simplificados como um todo, em lugar de se manterem como um agrupamento de objectos mais simples simplificados individualmente. Por outro lado, quando não é implementável a variação do nível de detalhe de objectos complexos, deve ser evitada a eliminação dos objectos simples que os compõem, sob pena de se poderem provocar efeitos desagradáveis no conjunto.

São também conhecidas algumas abordagens que tentam utilizar imagens para simular a geometria dos objectos mais distantes e abordagens mistas que tentam mapear imagens sobre geometria muito simples [Sillion97].

2.6.3 Controlo da taxa de refrescamento

Graças à utilização de diversas representações dos objectos, com níveis de detalhe variáveis, é possível ajustar o factor de escala do nível de detalhe em tempo real, não só com base na distância para o ponto de vista, mas também em função da saturação (*stress*) da pipeline gráfica verificada durante os últimos ciclos de geração de imagem. São também conhecidos desenvolvimentos no sentido de seleccionar o nível de detalhe de cada objecto com base na previsão de custo de geração de uma imagem de forma a maximizar sempre a sua qualidade [Funkhouser93].

A capacidade para ajustar eficientemente o nível de detalhe visual de cada objecto, aliada à possibilidade de atraso do instante de visualização de uma nova imagem, facilitam a realização de simulações visuais com uma frequência de actualização da imagem constante e predeterminada. No entanto, em sistemas de simulação onde o processamento do comportamento dos elementos autónomos representa um peso significativo, as técnicas referidas não permitem obter a taxa de actualização de imagem desejável. Além disso, devido às variações que se verificam normalmente no processamento necessário para a simulação dos elementos autónomos, torna-se impossível garantir a manutenção da taxa de actualização de imagem num valor fixo.

Para se conseguir uma taxa de actualização de imagem constante, faz falta alguma técnica que permita limitar os processamentos, tanto do processo de síntese de imagem, como do processo de simulação. Isto pode ser obtido pela utilização de algoritmos de simulação com detalhe variável, regulado em tempo real a partir de uma avaliação da saturação do sistema.

2.6.4 Billboards

Um billboard é um objecto especial que se orienta de forma a seguir sempre a direcção de observação. Os billboards são muito úteis para a representação de objectos complexos que possuem uma certa simetria por um ou mais eixos. O billboard segue o ponto de vista rodando sobre um eixo ou um ponto, de forma a apresentar sempre a mesma imagem ao observador utilizando menos polígonos que uma modelação sólida tradicional. Um exemplo clássico da utilização de um billboard é a representação de uma árvore com um simples quadrilátero texturado.

2.7 Tecnologias disponíveis

São muitas as tecnologias disponíveis que podem contribuir para o desenvolvimento de um simulador visual interactivo. Pela sua grande relevância, nesta secção faz-se um breve referência à VRML, à OpenGL e ao Performer.

2.7.1 VRML

VRML (Virtual Reality Modeling Language) é uma linguagem de descrição de conteúdos multimédia tridimensionais na Internet, definida por uma norma internacional (ISO/IEC 14772). A primeira versão da especificação da linguagem VRML 1.0 foi criada pela Silicon Graphics tendo por base o formato *Open Inventor* [Wernecke94].

A segunda versão do VRML (2.0) ampliou de forma significativa as capacidades oferecidas pela versão 1.0. Esta versão foi originalmente desenvolvida pela equipa de VRML da Silicon Graphics com contributos de diversas entidades ligadas aos desenvolvimentos dos sistemas interactivos de tempo real.

Em Dezembro de 1997 o VRML97 substituiu o VRML2.0 e foi formalmente distribuído como uma norma internacional ISO/IEC 14772-1:1997. O VRML97 é quase idêntico ao VRML 2.0, apresentando apenas alguns melhoramentos ao nível editorial do documento de especificação e algumas diferenças funcionais pouco significativas. Desde então o VRML97 tem vindo a ser adoptado como plataforma base de desenvolvimento de aplicações interactivas de simulação tridimensional por um número crescente de empresas e especialistas.

2.7.2 Opengl

OpenGL é uma biblioteca de funcionalidades gráficas vocacionada para o desenvolvimento de aplicações 2D e 3D, portáteis e interactivas.

A *OpenGL* foi inspirada na biblioteca *IrisGL* [McLendon92] e introduzida em 1992. Desde então, tornou-se o standard industrial para o desenvolvimento de aplicações destinadas a uma grande variedade de plataformas computacionais.

Ao contrário da biblioteca *IrisGL*, sua antecessora, que era propriedade da Silicon Graphics, e utilizável apenas num conjunto restrito de plataformas, a biblioteca *OpenGL*

corresponde a um standard aberto, ao qual aderiram os principais fabricantes de hardware e software, permitindo a portabilidade das aplicações desenvolvidas segundo esta norma.

OpenGL permite reduzir o tempo de desenvolvimento de aplicações 3D pela disponibilização de funcionalidades como a síntese de imagem, iluminação e mapeamento de texturas. Para facilitar a sua implementação em diferentes plataformas e ambientes gráficos, a biblioteca *OpenGL* não inclui funcionalidades de manuseamento de janelas, deixando a sua implementação para pacotes específicos do ambiente gráfico.

Mais informações sobre a biblioteca *OpenGL* podem ser encontradas em [Woo99].

2.7.3 Performer

O *Performer* é um conjunto de ferramentas de desenvolvimento, especialmente vocacionado para aplicações de simulação visual tridimensional em tempo real [Rohlf96]. Tradicionalmente, a utilização deste software tem estado limitada a estações gráficas Silicon Graphics. As aplicações baseadas em *Performer* têm podido tirar partido da potencialidade deste software para otimizar o desempenho de estações gráficas deste tipo. Recentemente, este software foi também disponibilizado para computadores do tipo PC utilizando o sistema operativo *Linux*. Tal facto permite encarar com optimismo a evolução das aplicações de simulação visual mais exigentes para plataformas de baixo custo.

2.7.3.1 Multiprocessamento

Uma das características mais importantes do *Performer* é a sua capacidade de multiprocessamento, que permite dividir uma aplicação de simulação visual em três processos separados: a simulação (ou aplicação), a selecção de objectos e o desenho.

O processo de simulação actualiza o estado dos elementos que constituem o cenário, incluindo a câmara virtual utilizada para a síntese de imagem. O processo de selecção percorre a árvore de descrição dos objectos para seleccionar aqueles que se encontram potencialmente visíveis. Estes objectos são adicionados a uma lista (display list) que é depois utilizada pelo processo de síntese de imagem (desenho). A alocação dos processadores disponíveis a cada um destes processos pode ser configurada de acordo com os requisitos da aplicação. As variáveis utilizadas em mais do que um processo são armazenadas em áreas partilhadas de memória.

2.7.3.2 Hierarquia da base de dados

Numa aplicação *Performer*, a definição da cena é armazenada de forma hierárquica numa árvore com raiz num nó do tipo *pfScene*, como a apresentada na figura 12. Os outros nós da árvore podem ser de qualquer um dos tipos derivados de *pfNode*, como, por exemplo, nós de agrupamento (*pfGroup*), nós que aplicam transformações fixas (*pfSCS*) ou variáveis (*pfDCS*), nós de selecção de geometria (*pfSwitch*), de animação (*pfSequence*) ou de selecção do nível de detalhe (*pfLOD*). A figura 11 apresenta a hierarquia das classes disponibilizadas pelo *Performer* para definição dos nós da árvore de objectos.

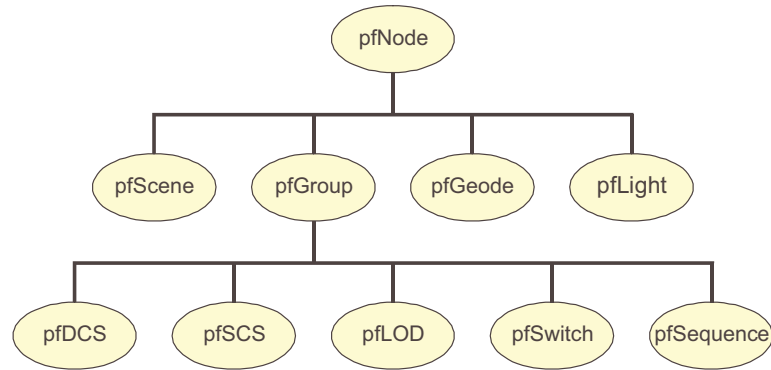


Figura 11. Hierarquia de classes Performer

A figura 12 apresenta um exemplo de uma árvore de objectos de uma cena de uma aplicação *Performer*.

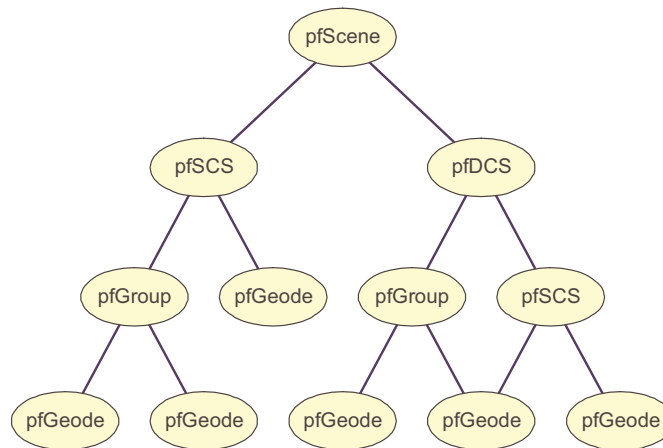


Figura 12. Exemplo de uma base de dados Performer

A definição da geometria dos objectos da cena está de facto apenas nos nós inferiores (pfGeoSet), agrupados em conjunto com a definição das propriedades respectivas (pGeoState) dentro de nós do tipo pfGeode, conforme se apresenta na figura seguinte.

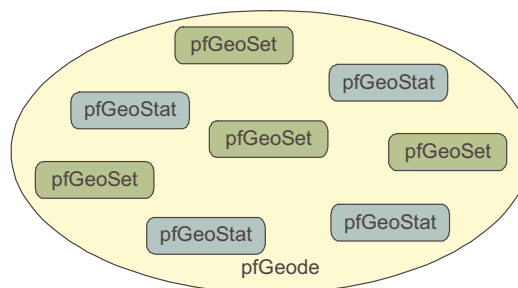


Figura 13. Definição da geometria

2.7.3.3 Estrutura de uma aplicação Performer

Uma aplicação *Performer* é constituída essencialmente um por ciclo principal que é executado de forma síncrona com o varrimento vertical da imagem. A execução deste ciclo começa logo depois de realizadas as inicializações e dura até que a aplicação é terminada.

2.7.3.3.1 Inicialização

Uma aplicação baseada em *Performer* começa sempre por efectuar as inicializações requeridas que incluem a alocação da memória partilhada pelos diversos processos, a definição e a configuração do modo de multiprocessamento e a especificação dos canais de síntese de imagem.

Uma vista de uma cena é obtida através de um canal de síntese de imagem (pfChannel). Diversos canais podem partilhar o mesmo hardware gráfico (pfPipe) de forma a dar origem a diversas vistas independentes.

A inicialização da aplicação inclui a criação das estruturas hierárquicas de memória utilizadas para a definição da cena. A hierarquia de uma cena é criada a partir de um nó do tipo pfScene, conforme se apresenta na figura 12.

Normalmente, a definição da cena e a sua hierarquia são importadas de ficheiros externos, utilizando as funcionalidades disponíveis. O *Performer* disponibiliza directamente funcionalidades para a leitura de descrições de ambientes em diversos formatos vulgarizados.

Quando os processos de inicialização estão concluídos é iniciado o ciclo de simulação que durará até ao final da aplicação.

2.7.3.3.2 Ciclo de simulação

A simulação de uma aplicação baseada em *Performer* é implementada num ciclo que chama continuamente os processos de actualização da cena, de actualização da vista, de selecção (*culling*) e de síntese de imagem.

Durante a fase de selecção de objectos, a árvore de objectos é percorrida e é determinado o subconjunto de nós que se encontra abrangido pela pirâmide de visualização. Cada um destes objectos é adicionado a uma lista, para ser mais tarde utilizado pelo processo de visualização. Um processo de selecção deste tipo corresponde a uma selecção tradicional de objectos pela pirâmide de visualização como a que foi analisada na secção 2.6.1.

Quando é necessária a determinação de colisões contra objectos na cena, a base de dados é novamente percorrida, testando hierarquicamente a intersecção da geometria afecta a cada nó com um segmento de recta predefinido (normalmente na forma de um objecto da classe pfSeg).

A fase de desenho recebe como entrada a lista de objectos seleccionados pelo processo anterior e transfere-os para o hardware de síntese de imagem.

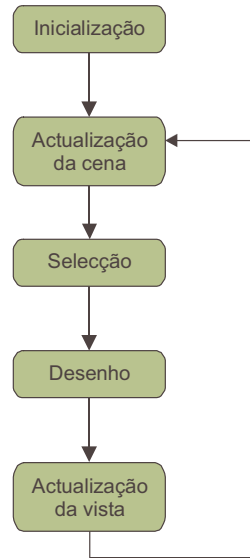


Figura 14. Ciclo principal de uma aplicação de simulação

É na fase de actualização da cena que são realizados os processamentos necessários ao movimento dos objectos presentes na cena. Por outro lado, a fase de actualização da vista destina-se apenas ao processamento das alterações da cena cuja latência possa ser considerada crítica. Neste conjunto são normalmente consideradas, por exemplo, as alterações da posição da câmara em função dos movimentos da cabeça detectados pelo tracker de um HMD.

2.8 Exemplos de simuladores de condução

Nesta secção são apresentados alguns dos simuladores de condução conhecidos mais significativos. Uma lista mais exaustiva dos simuladores de condução, com ligações para as respectivas páginas de descrição na Internet, pode ser encontrada em [Gauriat97]. Aí é possível contabilizar a existência de 37 simuladores científicos, em funcionamento ou em desenvolvimento, integrados em projectos ligados a Universidades, institutos de investigação ou organismos oficiais. Destes, 15 localizam-se na América do Norte e 15 na Europa, incluindo o simulador Português DriS. Este equilíbrio desaparece se, de entre estes simuladores científicos, forem contabilizados apenas os que possuem base móvel. Uma análise às características dos postos de condução utilizados por cada um dos simuladores científicos referidos em [Gauriat97] permite identificar a existência de 3 simuladores de base móvel na América do Norte e de apenas um simulador deste tipo no continente Europeu.

Os exemplos que se seguem foram seleccionados pela sua relevância, constatada através dos trabalhos experimentais já realizados. São referidos não só simuladores desenvolvidos em projectos ligados a Universidades, Institutos de Investigação ou organismos oficiais Europeus (LADS, TNO, Groningen, VTI) e Americanos (Iowa, UMITRI e NADS), como

também simuladores pertencentes a empresas da indústria automóvel (Renault e Daimler-Benz).

2.8.1 O simulador de condução LADS

O simulador de condução LADS (Leeds Advanced Driving Simulator) foi desenvolvido na Universidade de Leeds com objectivos de realização de estudos científicos na área de tráfego. Utiliza um veículo Rover 216GTi completo, modificado de forma a permitir a captação dos controlos de condução e o fornecimento de informações através do painel de instrumentos.

Numa primeira fase, a síntese de imagem esteve a cargo de uma estação gráfica SGI VTX que executava uma aplicação desenvolvida directamente em OpenGL. Actualmente é utilizada uma estação gráfica SGI Onyx RealityEngine 2 com dois processadores IP19, 4 *Raster Managers* e software desenvolvido sobre *Performer*. A imagem é projectada através de 4 projectores, obtendo-se ângulos de visibilidade de 120° para a frente e 50° para trás.

A monitorização e o controlo dos instrumentos do posto de condução está a cargo de um computador pessoal com duas placas de aquisição. Para a produção de som é utilizado um sintetizador por amostragem Roland S760 com duas colunas. O fornecimento de força na coluna da direcção é obtido através de um servo motor GEC BTM-3.

A figura 15 apresenta duas vistas deste simulador de condução em funcionamento.



Figura 15. O simulador de condução LADS

Mais informações sobre este simulador podem encontradas a partir da sua página de descrição na Internet [LADS00].

2.8.2 Simulador de condução do TNO

O simulador de condução do TNO utiliza um veículo Volvo, modelo 240, cortado de forma a facilitar o seu manuseamento.

A simulação é efectuada num computador do tipo PC que envia periodicamente as posições dos objectos móveis à pipeline gráfica Evans & Shunderland ES2000. A vista da frente é criada a partir de 3 canais de 1024x1024 pontos de imagem, projectados por projectores Barco, permitindo apresentar imagens de 160°x35° [TNO00]. São também utilizados 3 monitores para a apresentação das imagens visíveis pelos retrovisores.

Na figura 16 apresenta-se uma vista do posto de condução utilizado neste simulador e a imagem que é fornecida ao condutor. Nesta figura é possível observar o pormenor do capot pintado de preto baço. A opção por este tipo de acabamento destina-se a reduzir os efeitos de reflexo da projecção na parte da frente do veículo do posto de condução.



Figura 16. O simulador de condução do TNO

Nos últimos anos tem vindo a ser preparada a futura evolução deste simulador para um sistema de base móvel

2.8.3 O simulador de condução do RUG-COV

O posto de condução do simulador do RUG-COV (*Centre for Environmental and Traffic Psychology* da Universidade de Groningen) foi criado a partir da modificação de um veículo BMW 518. Todos os instrumentos de controlo foram mantidos e todos os mostradores funcionam da forma normal. O motor foi removido e substituído por dois servo-motores acoplados, respectivamente, à coluna da direcção e ao acelerador, de forma a permitirem o fornecimento de pistas de força ao condutor.

Três projectores permitem preencher um ecrã de 165x45° colocado na frente do posto de condução, a partir das imagens sintetizadas do ambiente de condução. O projector central utiliza uma resolução de 1280x1024 pixels, enquanto os projectores laterais utilizam uma resolução mais baixa de 640x512 pixels.

As figuras 17 e 18 apresentam duas vistas deste simulador. A imagem da figura 17 foi obtida de dentro da cabina do posto de condução.

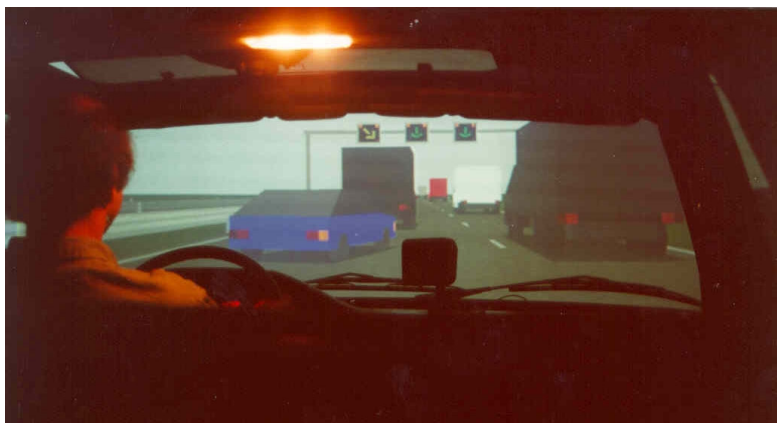


Figura 17. Vista do interior do posto de condução do simulador RUG-COV

Na figura 18 é possível observar a posição do ecrã relativamente ao posto de condução e o pormenor da imagem do retrovisor que é disponibilizada pelo projector central.



Figura 18. Vista do simulador RUG-COV em funcionamento

Em [Wolffelaar98] é possível encontrar uma breve descrição deste simulador.

2.8.4 Simuladores de condução do VTI

As diversas versões de simuladores do Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) têm-se mantido, desde há longos anos, entre as melhores implementações de simuladores de condução científicos.

A versão actualmente em funcionamento integra um corpo de um veículo que foi cortado e montado sobre uma plataforma móvel. Utiliza um sistema gráfico de desenvolvimento próprio que permite gerar 3 canais de 1040x625 pixels que são apresentados num ecrã circular através de projectores Barco Data 808, permitindo um ângulo de visibilidade horizontal de 120° e vertical de 30°.

O software foi desenvolvido em linguagens Fortran e C e corre em computadores Compaq Alphaserver. A plataforma móvel, onde estão montados o posto de condução, o ecrã e os

projectores, foi também desenvolvida especialmente para este simulador de condução e diferencia-se da maioria das plataformas móveis encontradas nos outros simuladores. Para além de permitir a inclinação do conjunto com 4 graus de liberdade, esta plataforma permite também impor movimentos laterais com 3.5 metros de amplitude.

A figura 19 apresenta uma vista deste simulador em funcionamento.



Figura 19. Vista do simulador de condução VTI em funcionamento

Neste momento está em fase de desenvolvimento uma nova versão de simulador que permitirá a simulação de condução de veículos automóveis e de camiões. Esta nova versão deverá estar funcional no final de 2002 e destina-se a substituir o simulador actualmente em funcionamento, permitindo uma maior amplitude de movimentos, além de outros melhoramentos técnicos. Uma das características mais significativas deste novo simulador será a possibilidade de rodar 90° o conjunto montado sobre a plataforma móvel. Esta nova orientação permitirá optar por uma configuração alternativa capaz de simular com precisão as forças de reacção verificadas nas travagens e nas acelerações longitudinais, embora perdendo realismo na simulação das acelerações centrípetas.

2.8.5 Simuladores de condução na Universidade de Iowa

Na Universidade de Iowa existem actualmente em funcionamento dois simuladores de condução. O simulador IDS (Iowa Driving Simulator) [Kuhl95][Choi98] e o Hank [Alloyer97b] [Hank99].

O simulador Hank tem sido desenvolvido com a colaboração da Universidade de Valência e a Universidade de Rennes, e considera-se operacional desde 1997. Pretende vir a constituir um conjunto de ferramentas de software que possam ser disponibilizadas publicamente para auxiliar a implementação de outros simuladores de condução. Utiliza

bases de dados visuais criadas a partir do software de modelação *Multigen* e a geração de imagem é baseada em máquinas Silicon Graphics, com aplicações desenvolvidas sobre *Performer*.

O simulador IDS utiliza um ecrã circular de 360° e um corpo de um veículo completamente instrumentado. O conjunto é movimentado por uma plataforma com 6 graus de liberdade, de acordo com as manobras efectuadas pelo condutor. Este simulador encontra-se em fase de desactivação, uma vez que será substituído pelo simulador NADS (National Advanced Driving Simulator).

O simulador NADS [NADS00] pretende vir a ser o simulador de condução mais realista do mundo. Está a ser montado na Universidade de Iowa com o apoio de diversas empresas da Indústria e sobretudo de organismos oficiais como a NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) [NHTSA00]. Prevê-se a sua entrada em funcionamento ainda durante o ano de 2000.

O simulador NADS utilizará um ecrã circular de 360°, dentro do qual é colocado o veículo para servir de posto de condução. Um sistema exterior de transporte permitirá a troca do veículo em apenas uma hora, de forma a facilitar a realização de experiências com diferentes tipos de veículos. Todo o conjunto será montado numa plataforma hidráulica com seis graus de liberdade, destinada a simular os movimentos de alta frequência mas com percurso limitado. Esta plataforma é colocada sobre uma outra que permite reproduzir movimentos de frequência mais baixa mas com grande amplitude, conforme se pode observar na figura 20. Os movimentos permitidos por esta plataforma inferior serão compostos por deslocamentos no plano horizontal com uma amplitude de 15x15 metros e movimentos de rotação até 360°, sobre um eixo vertical.

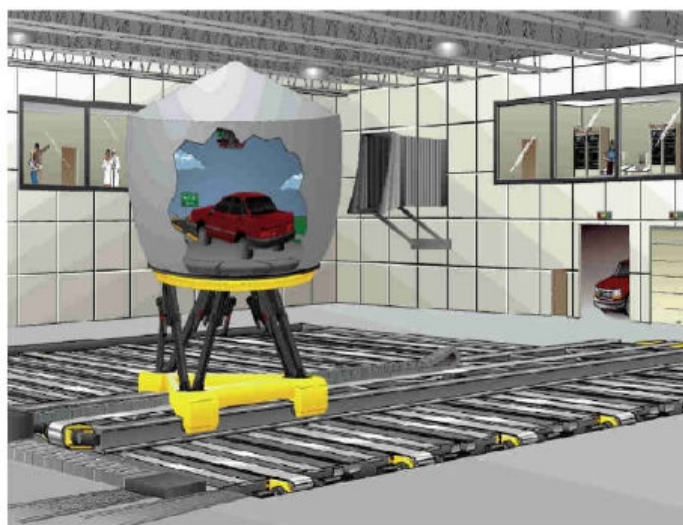


Figura 20. Perspectiva do que será o simulador NADS

2.8.6 Simulador de condução do UMTRI

O simulador de condução do UMTRI (University of Michigan – Transportation Research Institute) é apresentado como um simulador de baixo custo e desempenho moderado utilizado para ensaios de novos equipamentos de automóveis e comportamentos de condutores.

Este simulador é baseado numa rede de computadores Macintosh e num posto de condução de base fixa. Permite apresentar uma imagem de qualidade aceitável que preenche 30° do campo visual frontal do condutor. Oferece ainda som multi-canal, reacção de força no volante e vibração vertical.

A figura 21 apresenta um exemplo de uma imagem disponibilizada por este simulador.



Figura 21. Imagem apresentada pelo simulador de condução da UMTRI

Em [MacAdam93] é possível encontrar uma descrição deste simulador de condução.

2.8.7 O simulador de condução da DRI

O simulador de condução da DRI (Dynamic Research Inc.) é um protótipo interactivo com base móvel que tem sido utilizado em estudos de comportamentos de condutores e de parâmetros mecânicos e rodoviários. O condutor utiliza um posto de condução baseado num corpo de um veículo real cujos mostradores e actuadores foram instrumentados.

As imagens dos ambientes rodoviários são geradas numa estação gráfica SGI Onyx com várias pipelines gráficas (RE2 e IR) e apresentadas através de 3 projectores Barco. A simulação dinâmica é efectuada numa estação DEC Alpha que também controla o movimento da plataforma móvel com 6 graus de liberdade onde estão montados os ecrãs, os projectores e o posto de condução. O fornecimento de pistas de força é completado pela força de reacção no volante que é também fornecida a partir dos resultados da simulação dinâmica.



Figura 22. O simulador de condução DRI

Algumas informações sobre este simulador de condução podem ser encontradas em [DRI98].

2.8.8 O simulador de condução da Daimler-Benz

Um dos simuladores de condução mais avançados do mundo é o da Daimler-Benz, localizado na Alemanha e apresentado na figura 23. Este simulador encontra-se operacional desde 1985 e a sua versão original utilizava um computador DEC VAX 900, permitindo a visualização de cenários com 252 objectos, 24 dos quais com movimento.

Utiliza um sistema de projecção com 6 projectores num ecrã circular de 360° que envolve um veículo completo. Cinco projectores são utilizados para apresentar a imagem de 180° da vista frontal e o sexto projector é utilizado para apresentar a vista traseira.

Todo o conjunto está montado numa plataforma hidráulica com seis graus de liberdade. Recentemente foi adicionada a capacidade de movimentar toda a plataforma, de 18 toneladas, na horizontal, com uma amplitude de 5.6 metros. Este melhoramento permitiu a criação da sensação de forças laterais mais duradouras.

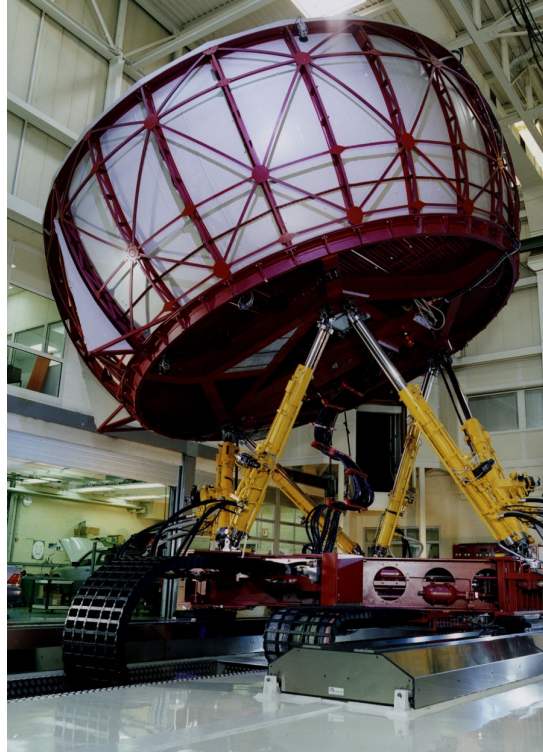


Figura 23. O simulador de condução de base móvel da Daimler-Benz

Uma apresentação deste simulador pode ser encontrada em [Daimler97].

2.8.9 Simuladores da Renault

O centro de investigação da Renault tem desenvolvido vários simuladores de base fixa desde 1989. Nos últimos anos foi desenvolvido um simulador de base móvel que se tornou operacional em 1999. Com este simulador pretende-se obter um maior realismo graças à melhor consistência entre os estímulos visuais e de força, de forma a permitir a sua aplicação ao estudo de dispositivos de controlo dinâmico e investigação na área do conforto dos veículos (bancos e suspensões).

O actual simulador de condução da Renault é constituído por um corpo de um veículo Renault Clio II cujos instrumentos de controlo foram equipados com sensores. As acções do condutor são captadas por estes sensores e enviadas a um computador que trata do modelo dinâmico do veículo. O corpo do veículo encontra-se montado sobre uma plataforma hidráulica com 6 graus de liberdade. Contrariamente ao que acontece em muitos dos outros simuladores de condução de base móvel, a plataforma utilizada neste simulador apenas permite movimentar o corpo do veículo. Os ecrãs e os projectores utilizados encontram-se montados de forma fixa.

O subsistema de geração de imagem é constituído por uma estação gráfica Silicon Graphics Onyx InfiniteReality que gera os três canais de vídeo utilizados para a vista da frente e por

computadores PC Pentium II com placas gráficas Quantum 3D Voodoo 2 que geram outros três canais de vídeo destinados a simular as imagens para os espelhos retrovisores.

A figura 24 apresenta uma vista deste simulador de condução. É possível observar os projectores utilizados para a apresentação da imagem frontal, que se encontram fixados ao tecto.



Figura 24. O simulador de condução de base móvel da Renault

A figura 25 apresenta uma vista de um ambiente rodoviário gerado por este simulador de condução.



Figura 25. Vista de um ambiente rodoviário no simulador de condução da Renault

2.9 Sumário

Neste capítulo abordaram-se as tecnologias utilizadas para o desenvolvimento de simuladores de condução. Foram também apresentadas breves descrições de alguns dos simuladores de condução mais avançados.

Os simuladores com fins científicos requerem um nível de realismo elevado, grande flexibilidade de confirmação do ambiente de condução e capacidade de produção de resultados rigorosos e validáveis. Para isso, a construção de um simulador exige a

cooperação de diversos subsistemas, que devem ser desenvolvidos de forma coordenada por especialistas de áreas muito distintas.

Apesar dos subsistemas de síntese e apresentação de imagem e do posto de condução serem normalmente os componentes mais dispendiosos de um simulador de condução de base fixa, é ao nível da implementação e especificação de tráfego autónomo que se verificam actualmente as maiores necessidades de evolução. Por este motivo, as abordagens de implementação do tráfego autónomo em simuladores de condução são apresentadas de seguida no capítulo 3.

Capítulo 3

Agentes Autónomos

A possibilidade de incluir participantes autónomos é crucial para o realismo de uma simulação visual interactiva [Zyda94]. Uma simulação realista da condução deve portanto incluir outros veículos para além daquele que é conduzido pelo utilizador [Alloyer97a]. A adição de peões pode também ser fundamental para uma simulação convincente de determinados tipos de ambientes rodoviários.

Nos últimos anos assistiu-se a um forte desenvolvimento nas tecnologias e na acessibilidade dos sistemas de síntese de imagem. Esta evolução da capacidade de síntese de imagem foi ainda mais significativa do que a verificada na capacidade de processamento no mesmo período. Este facto permitiu uma proliferação da utilização de sistemas de simulação visual interactiva com qualidade de imagem aceitável mas, paradoxalmente, com elementos dinâmicos de baixa qualidade e em pequena quantidade.

A maioria dos sistemas de realidade virtual actuais apenas permitem ao participante movimentar-se dentro de um mundo estático e frequentemente rígido. Apenas alguns sistemas mais avançados oferecem a possibilidade de inclusão de objectos móveis ou dotados de movimento. Os movimentos aplicados aos objectos, quando existem, são obtidos a partir de guiões criados especialmente para cada caso, com a possível ajuda de software de animação. Uma vez que estes guiões têm de ser criados para todos os objectos com movimento, esta técnica de especificação torna-se impraticável para ambientes de alguma complexidade, sobretudo se for necessário considerar acontecimentos

imprevisíveis, provocados pela acção de participantes humanos. O processo de criação de ambientes virtuais dinâmicos e complexos pode, no entanto, ser drasticamente simplificado pela inclusão de agentes autónomos. Estes agentes, dotados de capacidade para reagir interactivamente ao ambiente envolvente, perseguir objectivos e tomar decisões com base no seu comportamento, podem ser utilizados para povoar, de forma realista, ambientes virtuais extensos.

Infelizmente, a capacidade de processamento normalmente disponível nos computadores actuais não permite a simulação em tempo real de um grande número de agentes autónomos baseados em comportamento. Fica assim dificultado o povoamento adequado dos ambientes virtuais extensos, cuja visualização é já possível nos actuais sistemas de síntese de imagem aliados a técnicas de aceleração, como a selecção hierárquica de objectos e a variação do nível de detalhe.

Neste capítulo abordam-se, de forma sucinta, diversas áreas que podem e devem contribuir para a implementação de condutores competentes e realistas de veículos virtuais autónomos destinados ao povoamento dos ambientes rodoviários utilizados num simulador de condução. Depois de uma breve abordagem à forma como os condutores humanos resolvem a tarefa de condução dos veículos automóveis reais, descrevem-se as tecnologias utilizadas na implementação de controladores de veículos automóveis reais e as metodologias disponíveis para a implementação de agentes realistas em ambientes virtuais.

3.1 O Conductor Humano

O estudo da tarefa de condução realizada por condutores humano é fundamental para a concepção de qualquer condutor automatizado de veículos, pelo facto reconhecido de serem humanos os únicos condutores competentes para condução de veículos em vias públicas. No caso do desenvolvimento de condutores automatizados de veículos virtuais destinados a simuladores de condução, este facto é ainda mais importante, uma vez que o objectivo é a criação de ambientes típicos de condução realizada por humanos.

Nesta secção abordam-se alguns estudos de comportamento de condutores humanos que podem ser importantes para a concepção e implementação de um modelo artificial de condutor realista.

A tarefa de condução de um veículo numa estrada pública é uma batalha constante entre a perseguição dos objectivos pretendidos e as restrições impostas pelo ambiente circundante. Em cada instante, um condutor tem de decidir a manobra a realizar, com base no seu conhecimento do ambiente envolvente e do muito pouco conhecimento que tem sobre as intenções dos condutores dos outros veículos. Numa situação típica de condução numa via pública, a abundância de informação é tal que torna impraticável o seu processamento completo em tempo útil para a identificação de decisões óptimas.

Felizmente, a pesquisa e opção de soluções óptimas não é fundamental para a obtenção de uma condução competente. Pelo contrário, a opção por más decisões pode levar a consequências graves e fortes penalizações. Durante a maior parte do tempo de uma

condução normal basta assegurar que as opções tomadas levam a uma situação final aproximada da situação final desejada, mantendo o nível de segurança dentro de limites aceitáveis. A segurança absoluta não pode ser garantida nem mesmo por uma condução muito cautelosa. Existirá sempre um pequeno nível de risco que é inevitável.

A tarefa de condução tem sido estruturada em 3 níveis de sub-tarefas, conforme se apresenta na figura 26 [Michon85].

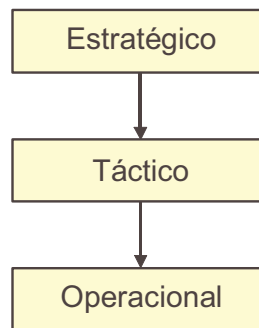


Figura 26. Divisão das tarefas de condução em 3 níveis

O nível estratégico deverá tratar das decisões a médio prazo, de forma a tentar satisfazer os objectivos de longo prazo definidos superiormente. Quando ao veículo for solicitado que se desloque até um determinado local, é o nível estratégico que deverá seleccionar a velocidade de cruzeiro e o percurso a utilizar. Estas decisões correspondem à selecção dos objectivos que os níveis inferiores terão de perseguir. No nível estratégico, as decisões são tomadas com base no processamento de informação essencialmente estática, ou com alterações pouco frequentes, como por exemplo o conhecimento da rede de estradas. As metodologias utilizadas para a especificação das tarefas deste nível baseia-se normalmente em técnicas de inteligência artificial.

O nível tático trata das decisões de curto prazo, de forma a cumprir os objectivos de médio prazo impostos pelo nível estratégico. Deverá tomar as decisões de ultrapassar ou não o veículo da frente, mudar ou não de via, etc. Estas decisões de curto prazo são comunicadas ao nível operacional. De entre os três níveis de tarefas indicados na figura 26, o nível tático é o que mais dificuldades oferece a uma especificação ou implementação computacional competente. As decisões a este nível são tomadas tendo em conta grande quantidade de informação sobre o estado do tráfego envolvente, que sofre fortes variações em curtos intervalos de tempo e que nem sempre pode ser completamente observado. É a este nível que as capacidades humanas para realizar selecções de informação relevante e tomadas de decisão rápidas e competentes mais se fazem sentir.

O nível operacional toma as medidas imediatas necessárias para tentar cumprir os objectivos de curto prazo solicitados pelo nível tático. Decide em que pedal actuar, como afectar o volante, etc.... As decisões a este nível são tomadas de forma muito mecanizada, a partir da monitorização contínua da velocidade e da posição do veículo na pista.

Existem diversas implementações testadas de sistemas electrónicos de controlo operacional de veículos automóveis. As técnicas de inteligência artificial permitem também resolver de forma satisfatória os processos necessários à implementação de um nível estratégico competente. Actualmente, é ao nível tático que se levantam as maiores questões que devem ser resolvidas para a implementação de um condutor artificial de veículos destinados à evolução em vias públicas. Até agora, os únicos condutores de veículos reais capazes de decisões táticas competentes são humanos [Sukthankar97].

Para a especificação das tarefas que compõem cada um dos níveis, e dos processos utilizados pelos humanos na sua resolução, diversos psicólogos têm desenvolvido vários modelos descritivos de condutores. Os modelos de condutores são frequentemente utilizados no desenvolvimento de controladores automatizados de veículos reais, de sistemas de alerta e ajuda de condutores humanos e de veículos virtuais autónomos em sistemas de simulação de condução e de tráfego.

Na secção 3.1.1 examinam-se alguns tipos de modelos de condutores conhecidos cuja importância pode ser considerada relevante para o desenvolvimento de condutores automatizados de veículos virtuais num simulador de condução.

3.1.1 Modelos de condutores

Os modelos de condutores são necessários em trabalhos de investigação em diversas áreas. Os psicólogos utilizam-nos para o estudo do comportamento dos condutores. Os construtores de veículos automatizados utilizam-nos como referência para o desenvolvimento dos algoritmos de controlo de veículos. Os projectistas de sistemas de alerta e de ajuda ao condutor utilizam-nos na interpretação de situações de tráfego e na especificação de detectores de situações de perigo. Os legisladores e os educadores utilizam-nos para a imposição de regras de conduta com vista a aumentos de segurança.

Os modelos de condutores surgem normalmente da análise de dados recolhidos de experiências de condução real como a descrita em [James84]. As metodologias de recolha de informação podem incluir meios técnicos sofisticados como veículos instrumentados, ou limitarem-se à emissão de opiniões mais ou menos subjectivas acerca das acções desencadeadas pelo condutor.

Dependendo do tipo de descrição que fazem da actividade de condução, os modelos de condutores podem ser classificados em diversos tipos, que se apresentam nas secções seguintes: Modelos de Tarefas, Modelos de Risco, Modelos de Controlo, Modelos Cognitivos e Modelos Perceptuais.

3.1.1.1 Modelos de Tarefas

Os modelos baseados em tarefas descrevem exaustivamente as tarefas fundamentais que compõem a actividade da condução, como por exemplo, a perseguição de outro veículo e a ultrapassagem. Por vezes, estas descrições são efectuadas decompondo estas tarefas

fundamentais em sub-tarefas mais elementares como a manutenção da velocidade e a alteração de via, como se apresenta em [McKnight70].

Estes modelos são com frequência descritos sob a forma de conjuntos de regras simples, de entendimento imediato para humanos, mas inadequadas para a aplicação em sistemas automatizados. As dificuldades de aplicação destas regras em sistemas automatizados resultam essencialmente do facto de estas serem normalmente demasiado vagas e, por outro lado, de nem sempre possuírem uma aplicabilidade universal.

Por exemplo, regras como "Quando efectua uma ultrapassagem, o condutor selecciona uma via tendo em conta a velocidade do seu veículo, as manobras e a densidade do tráfego", não podem ser aplicadas directamente por sistemas automatizados utilizando linguagens de programação tradicionais. Mesmo para ambientes de inteligência artificial mais vocacionados para o tratamento de lógica incerta, a utilização de regras deste tipo implica uma definição mais concreta do que é o acto de ultrapassagem e de como os parâmetros de velocidade, manobras e densidade de tráfego influenciam a selecção da via.

Constatações como "Normalmente, o condutor ignora o movimento dos peões e dos veículos que não são importantes na condução" não são aplicáveis aos condutores automatizados porque não são de aplicação universal. Não é possível ignorar sempre os outros veículos e mesmo a selecção da informação essencial para o bom desempenho da condução obriga ao tratamento de todos os elementos de tráfego presentes.

Adicionalmente, regras como a anterior podem ser por vezes contraditórias com outras como "a presença de elementos móveis no campo visual pode distrair temporariamente o condutor".

Apesar destas dificuldades, os modelos de tarefas de condução devem ser considerados úteis para o trabalho de implementação de modelos de condutores automatizados, sobretudo se estes pretenderem de alguma forma imitar os condutores humanos. Mesmo que não possam ser aplicadas directamente, as regras de comportamento do condutor humano constituem directivas de alto nível, que os sistemas automatizados devem ser capazes de satisfazer.

3.1.1.2 Modelos de Risco

Os modelos de risco resultam de trabalhos de investigação em psicologia e percepção de risco. Estes modelos tentam explicar fenómenos observados em condutores como as disfunções temporárias, o excesso de velocidade, os tipos de agressividade e o elevado grau de intoxicação. Apesar de não serem essenciais à concepção de condutores destinados à substituição dos condutores humanos, os modelos de risco devem ser considerados sempre que o objectivo seja a implementação de condutores que tentam emular humanos, como se pretende nos simuladores de tráfego ou de condução. Diversas funções de monitorização do ambiente rodoviário podem ser inspiradas nos parâmetros de análise de risco dos condutores humanos, como por exemplo o tempo para impacto.

Um exemplo representativo de um modelo deste tipo é a teoria da Homeostase do Risco [Wilde94]. Segundo esta teoria, durante a realização de qualquer actividade, as pessoas aceitam um determinado nível de risco estimado subjectivamente em troca dos benefícios que esperam receber da actividade. Contrariamente ao que possa parecer natural, esta teoria prevê que os humanos ajustam os seus comportamentos de forma a manter constante (em vez de minimizar) o nível de risco sentido.

Uma experiência que estuda as implicações da teoria da manutenção do risco foi efectuada numa frota de táxis da cidade de Munique. Alguns dos táxis foram equipados com sistema de anti-bloqueio das rodas (ABS). Como é sabido, este sistema permite a manutenção do controlo da direcção mesmo em situações de forte travagem, pelo que seria de prever que os veículos equipados com ABS oferecessem uma maior segurança. Surpreendentemente, os resultados da experiência demonstraram que:

- O número de acidentes envolvendo veículos da frota não foi estatisticamente diferente para os dois tipos de veículos analisados na experiência. Aliás, o número de acidentes envolvendo veículos com ABS foi ligeiramente superior ao número de acidentes envolvendo veículos sem ABS.
- A gravidade dos acidentes verificados foi independente da presença ou não do ABS no veículo envolvido.
- Pela análise dos relatórios fornecidos pelo equipamento de monitorização instalado em cada veículo, constatou-se que os veículos equipados com ABS registavam mais desacelerações fortes do que os veículos sem ABS, presumivelmente em resultado de fortes travagens.
- Os veículos equipados com ABS efectuaram curvas mais fechadas.
- Os veículos equipados com ABS foram menos precisos no seu posicionamento na via.
- As distâncias guardadas para os veículos da frente foram mais curtas nos veículos equipados com ABS.
- Os veículos equipados com ABS causaram mais conflitos de tráfego.

Estas constatações provam que os condutores alteraram o seu comportamento de forma a manterem o nível de risco, apoiando portanto a teoria da Homeostase do Risco. Teorias deste tipo são frequentemente utilizadas para prever o insucesso da generalidade das medidas, de base legal ou tecnológica, destinadas a reduzir o número de acidentes rodoviários.

3.1.1.3 Modelos de Controlo

Os modelos de controlo tentam descrever o comportamento do conjunto veículo / condutor como um sistema de controlo em anel fechado. Estes modelos utilizam metodologias matemáticas com provas dadas no controlo de inúmeros sistemas realimentados, pelo que podem ser considerados como a alternativa mais adequada para a implementação de controladores dedicados à manutenção da velocidade e da posição na via, assim como a

outras tarefas operacionais da condução de veículos. No entanto, este tipo de modelos não tem aplicação significativa na descrição dos procedimentos de ordem táctica necessários à condução de veículos em vias públicas. Por outro lado, os modelos deste tipo assentam em tecnologias orientadas para o controlo eficiente de sistemas, nem sempre adequadas à modelação de acções humanas, com os seus erros e a sua diversidade. Esta dificuldade tem vindo a motivar trabalhos com o objectivo de criar modelos de controlo que permitam emular correctamente as acções de humanos, como o apresentado em [Nechyba98].

Em [MacAdam89] apresenta-se um modelo matemático do processo de controlo da direcção de um veículo, por humanos. Este modelo é concebido como um controlador óptimo seguido de um elemento de atraso da resposta.

Neste grupo podem também ser incluídos todos os modelos que servem de base a implementações de sistemas de controlo operacional de veículos reais ou de auxílio do condutor como o apresentado em [Allen96].

Na secção 3.3 abordam-se as metodologias de concepção de controladores em anel fechado, que são utilizadas nestes modelos.

3.1.1.4 Modelos Cognitivos

Os modelos cognitivos são teorias sobre a aquisição, a actualização e a utilização da informação durante a actividade de condução por humanos.

Para ser capaz de tomar as decisões de controlo adequadas, um condutor deve possuir informações correctas sobre o estado do seu próprio veículo e sobre o estado dos outros elementos de tráfego que o rodeiam (figura 27). O controlador de veículo automóvel tem, por exemplo, de conhecer a sua posição, a sua velocidade, as suas intenções e, tanto quanto possível, deve conhecer também os mesmos dados relativos aos veículos que o rodeiam. Informações sobre a estrada, o seu estado, a sinalização e as condições meteorológicas são também fundamentais para o bom desempenho da condução, uma vez que afectam o conjunto de acções possíveis.

O condutor mantém uma representação interna dos estados significativos dos elementos de tráfego envolventes. Esta espécie de base de dados é criada a partir das informações captadas pelos sentidos, mas é actualizada mesmo quando as entidades representadas não se encontram visíveis. A explicação dos processos de manutenção e actualização deste conhecimento quando não são recebidas informações directamente do mundo exterior, é uma das preocupações dos modelos cognitivos de condução. Estes processos variam de condutor para condutor e estão também relacionados com a experiência do condutor. Está demonstrado que os condutores com menos experiência são mais propícios a esquecerem-se por exemplo da existência de veículos que se encontram numa zona de oclusão.

Os modelos cognitivos tentam descrever os processos mentais utilizados na tarefa de condução. No entanto, a utilização destes modelos na implementação de um condutor computadorizado é dificultada pelo facto da maioria destes modelos serem constituídos apenas por um conjunto de descrições genéricas, sem informação concreta sobre a forma de

representação do conhecimento, a percepção de situações de tráfego nem o processamento da informação.

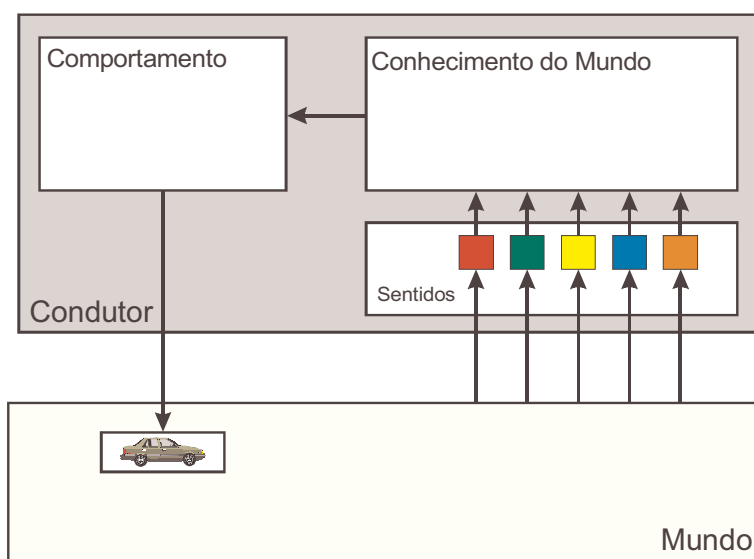


Figura 27. Conhecimento do mundo

Uma revisão e comparação de alguns destes modelos pode ser encontrada em [Molen87]. São também conhecidos trabalhos que tentam descrever modelos deste tipo em linguagens estruturadas vocacionadas para a programação simbólica [Aasman88].

Estes modelos são completados com os modelos perceptuais que abordam os processos de captura de informação do exterior.

3.1.1.5 Modelos Perceptuais

Os modelos perceptuais são utilizados para descrever os processos de captação de informação sobre o meio envolvente e assim compreender o comportamento dos condutores em situações de acidente, sugerir métodos de condução mais segura e motivar a utilização de dispositivos de profilaxia de colisões.

Na concepção de agentes condutores autónomos que tentam imitar condutores humanos, os modelos perceptuais são particularmente relevantes, sobretudo pela modelação de sensores realistas, de forma a reproduzir o desempenho dos sentidos humanos.

Nestes modelos são consideradas as oclusões e as distrações que originam faltas de informação, assim como a saturação perceptual motivada por excesso de informação fornecida ao condutor.

3.1.1.5.1 Falta de informação

O estado do tráfego envolvente é variável e apenas parcialmente observável. As informações que são adquiridas pelos sentidos podem ser incompletas ou conter erros devidos a enganos ou adição de ruído. Determinadas variáveis do estado do tráfego

envolvente podem não ser observáveis devido a oclusão temporária. Além disso, algumas variáveis como as condições de aderência da estrada não podem ser avaliadas directamente por nenhum dos cinco sentidos humanos.

O condutor não pode portanto basear-se somente nas leituras mais recentes dos seus sentidos. Ele tem de manter internamente uma representação do estado do mundo que actualiza sempre que obtém leituras significativas do mundo real. Durante os períodos de não observação de determinadas variáveis, o condutor realiza internamente uma simulação do desempenho dos elementos de tráfego relevantes, tendo em conta o seu comportamento esperado. Dependendo do grau de risco que o condutor se propõe correr e da situação envolvente, esta simulação pode considerar, probabilisticamente, as diversas alternativas que podem ocorrer devido às variáveis aleatórias existentes e à sua distribuição.

3.1.1.5.2 Excesso de informação

Os condutores de veículos automóveis recebem informação sobre o ambiente rodoviário pela alteração constante das leituras de diversos sensores. Uma vez que as limitações em termos de tempo impedem o processamento imediato de toda esta informação, o condutor tem de seleccionar, inteligentemente, qual é a informação mais crítica para a manutenção de um bom desempenho de condução. Desta forma, a actualização do conhecimento interno da situação envolvente pode ficar prejudicada também pelo excesso da informação captada pelos sentidos.

3.1.2 Objectivos típicos

Existem, algumas características dos condutores humanos que os tornam diferentes do modelo de condutor ideal que se tenta atingir quando se procura realizar um condutor automatizado para veículos reais. Um condutor automatizado de veículos automóveis reais deve tentar minimizar o risco, e não se deverá distrair ou cometer erros. Por outro lado, como demonstram os modelos de risco que serão referidos na secção 3.1.1.2, o condutor humano tem uma percepção do risco não exacta, tem períodos de distração e tenta maximizar os benefícios da viagem mantendo um nível de risco fixo. Alguns dos benefícios vulgarmente seleccionados por condutores humanos são:

- Chegar cedo ao destino.
- Ir à frente do outro carro.
- Sentir a aceleração ou a velocidade.
- Ver a paisagem.

A implementação de modelos computacionais que permitam afectar realisticamente o desempenho da condução em função da perseguição de objectivos deste tipo é uma questão complexa. Para além desta complexidade em termos de implementação, não são ainda conhecidos com precisão os efeitos provocados na tarefa de condução pelos condutores humanos, quando existe uma perseguição concorrente de um objectivo secundário como os referidos. Conhecimentos deste tipo podem ser obtidos através da realização de

experiências em simuladores de condução, como por exemplo o estudo da influência dos painéis publicitários descrito na secção 4.2.2.

Estas diferenças demonstram que a concepção de condutores autónomos destinados à simulação de tráfego ambiente num simulador não pode ser uma simples adaptação dos desenvolvimentos efectuados nos controladores de veículos ou *robots* reais. Num simulador realista de condução automóvel, o tráfego ambiente deve reagir como o tráfego real, caracterizado por condutores humanos, cada um com as suas características individuais.

3.1.3 Modelos computacionais

Os modelos computacionais tentam explicar, detalhadamente, como obter as acções de controlo do veículo em função dos dados percebidos acerca do ambiente rodoviário envolvente, de forma a permitirem uma implementação computacional quase directa. Correspondem normalmente a uma estruturação detalhada de modelos descritivos, como por exemplo os modelos de tarefas.

[Ünsal98] apresenta 4 modelos de condutores humanos simplificados, desenvolvidos com objectivos de simulação de tráfego em auto-estradas. Apesar de estes modelos não serem vocacionados para simuladores interactivos de condução, as metodologias desenvolvidas para a resolução das principais tarefas da condução são aplicáveis aos veículos autónomos que compõem o tráfego ambiente num simulador de condução interactivo.

Em [Reece91] apresenta-se um modelo computacional da tarefa de condução desenvolvido com o objectivo de vir a ser utilizado na condução de um veículo automatizado real. Apresenta uma abordagem baseada na análise da condução realizada por humanos, e está estruturado em 3 níveis, que correspondem aos apresentados na figura 26.

3.2 Níveis de modelos de simulação

A criação de ambientes virtuais dinâmicos pode envolver diversos níveis de modelação para além da tradicional modelação geométrica, conforme se apresenta na figura 28.

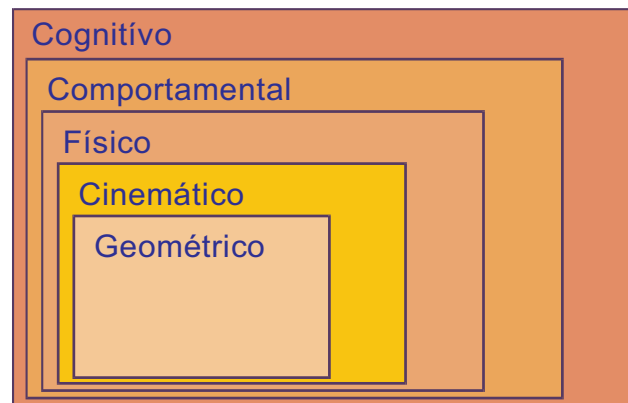


Figura 28. Níveis de modelação

Nas secções seguintes apresentam-se os modelos de simulação correspondentes a cada um destes níveis.

3.2.1 Modelos Geométricos

As técnicas de animação mais vulgares baseiam-se em modelos geométricos. O exemplo mais frequente de uma modelação geométrica é a definição de sequências de posições ou situações chaves, correspondentes a estados particulares em que o elemento animado se deve encontrar nos instantes especificados, como se utiliza vulgarmente na maioria dos produtos comerciais de animação. Estas chaves podem ser obtidas directamente a partir de dados recolhidos de acontecimentos do mundo real, ou da resolução de um modelo superior, através, por exemplo, de uma simulação de nível físico. A trajectória descrita pelo elemento animado é depois determinada a partir das chaves fornecidas e pela determinação de estados intermédios, utilizando uma metodologia de interpolação. A obtenção de animações agradáveis requer, para além da especificação cuidada das chaves, uma afinação precisa dos parâmetros utilizados no processo de interpolação.

Apesar dos esforços realizados na tentativa de reduzir a quantidade de dados necessários para animação de objectos virtuais a partir de chaves especificadas [Balaguer95], este tipo de animação continua a ser pesado e pouco interessante para animação de ambientes complexos.

Uma técnica interactiva de manipulação directa das chaves de animação consiste na captação do movimento de um actor real e no mapeamento dos movimentos captados do actor no objecto virtual correspondente. Para isso, são colocados diversos sensores de posição ou movimento no corpo de um actor e, por amostragem, são captadas as pistas correspondentes ao seu movimento. Esta técnica garante movimentos realistas mas pode ser difícil de aplicar a figuras com topologias muito diferentes das encontradas nos actores reais. A modificação interactiva dos movimentos armazenados é também uma tarefa quase impossível por outros meios que não seja a captação de uma nova sequência de chaves.

A passagem do conjunto discreto de chaves no espaço de estados para uma trajectória suave é realizada por interpolação. A maioria dos sistemas de animação actuais responsabiliza-se por efectuar esta interpolação, normalmente utilizando *splines*, permitindo ao preparador a parametrização da interpolação.

A técnica de animação por especificação de chaves é muito flexível, uma vez que permite especificar qualquer tipo de sequências de animação, mesmo as mais complexas. No entanto apresenta o inconveniente de requerer um esforço do preparador que tende a crescer proporcionalmente com o número de elementos animados, a duração da animação e o realismo pretendido.

Para exemplificar uma animação geométrica pode ser utilizado um modelo de um pêndulo como o apresentado na figura 29.

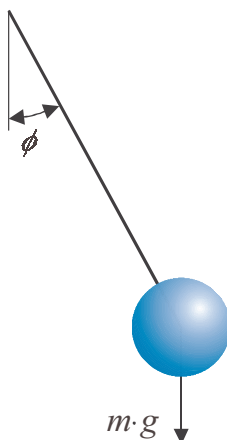


Figura 29. Pêndulo simples

A animação geométrica deste pêndulo pode ser obtida através da especificação das chaves de posição indicadas na tabela 1, para um alongamento máximo A e um período de oscilação T .

Tabela 1. Pistas geométricas para animação de um pêndulo simples

t	ϕ
0	A
$T/4$	0
$T/2$	$-A$
$3 \cdot T/4$	0

Com estas chaves e a interpolação adequada, é possível obter o movimento oscilatório desejado para o pêndulo, que corresponde à variação do ângulo de alongamento conforme indicado no gráfico da figura 30.

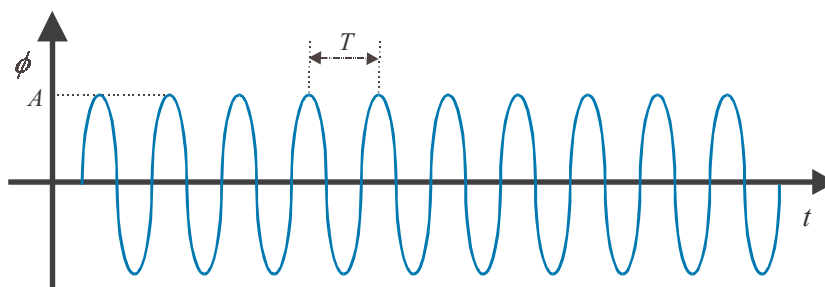


Figura 30. Variação do ângulo de alongamento do pêndulo ideal

No caso de ser necessário utilizar um movimento mais realista para o pêndulo, simulando também o efeito de amortecimento causado pelo atrito, como se exemplifica no gráfico da

figura 31, as chaves de posição teriam de ser definidas, utilizando alongamentos distintos e decrescentes para cada ciclo de oscilação do pêndulo.

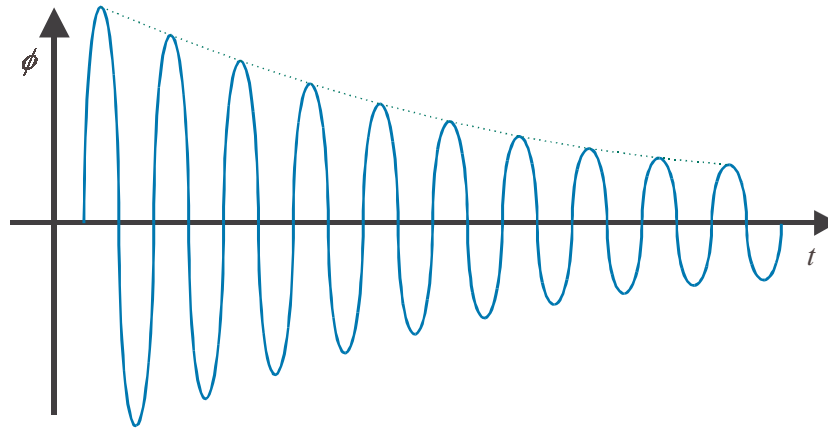


Figura 31. Variação do ângulo de alongamento do pêndulo amortecido

A tabela 2 apresenta um exemplo das chaves geométricas necessárias para a especificação do movimento de um pêndulo amortecido isolado.

Tabela 2. Chaves geométricas para animação de um pêndulo amortecido

t	ϕ
0	A_0
$T/4$	0
$T/2$	$-A_1$
$3 \cdot T/4$	0

Neste tipo de animações, o realismo obtido depende muito da correcção das chaves indicadas e da qualidade da interpolação efectuada. Como é evidente, é possível obter chaves com grande precisão através da resolução de modelos dinâmicos e cinemáticos. No entanto, no caso de as condições da animação poderem ser alteradas durante a simulação, a manutenção da correcção física exigiria a disponibilização de novos conjuntos de chaves.

3.2.2 Modelos Cinemáticos

Outra técnica de animação bastante vulgarizada baseia-se em modelos cinemáticos para especificar os movimentos dos objectos animados. Nestes modelos, o estado de cada objecto em cada ciclo de simulação é determinado pela resolução temporal das trajectórias definidas, por exemplo, através de equações de movimento. A definição destas trajectórias é uma tarefa que não faz parte da resolução de um modelo deste tipo, cabendo inteiramente ao preparador da animação. Estas trajectórias rígidas e predeterminadas podem ser obtidas directamente a partir de dados especificados pelo preparador do ambiente de simulação,

baseando-se em dados recolhidos do ambiente envolvente em tempo real ou na resolução de um modelo superior, através, por exemplo, de uma simulação de nível físico.

A criação de ambientes com uma grande quantidade de elementos animados, utilizando só modelos cinemáticos, resulta num trabalho excessivamente penoso. Mesmo quando se utilizam vários elementos animados do mesmo tipo ou semelhantes entre si, é necessário prever trajectórias diferenciadas para cada um dos elementos. Para além disso, a presença de um ou mais elementos controlados de forma interactiva pode impedir liminarmente a utilização de trajectórias rígidas e predeterminadas.

A utilização de um modelo cinemático para especificar o movimento do pêndulo ideal representado na figura 29, consiste na definição da equação de movimento que relaciona o ângulo de alongamento (ϕ) com o instante de tempo:

$$\phi(t) = A \cdot \cos(w \cdot t) \quad (1)$$

Ou, no caso do pêndulo amortecido:

$$\begin{cases} \phi(t) = A(t) \cdot \cos(w \cdot t) \\ A(t) = A_0 \cdot e^{-\xi \cdot t} \end{cases} \quad (2)$$

3.2.3 Modelos Físicos

As leis da física representam de forma precisa a maneira como as pessoas esperam que os objectos se movam. Por essa razão, os modelos físicos são utilizados na animação realista de partículas, corpos rígidos, objectos deformáveis, fluidos e, evidentemente, veículos. Estes modelos permitem uma reconstrução realista do movimento graças à simulação dinâmica que efectuam [Setas95].

São também incluídos neste nível os modelos biomecânicos que utilizam simulação física das estruturas internas (normalmente simplificadas) para a animação de modelos de animais. Exemplos de modelos deste tipo podem ser encontrados em [Girard85] [McKenna90] [Bruderlin89] [Hodgins95]. Muito do trabalho realizado nas áreas de animação e de robótica tem sido focado nas metodologias de obtenção das equações diferenciais de movimento de figuras articuladas.

Para animar o pêndulo apresentado na figura 29 utilizando simulação física, utiliza-se a resolução das equações diferenciais do movimento do pêndulo que são, no caso do pêndulo não amortecido:

$$\begin{cases} v(t) = -g \cdot \int \sin \phi(t) \cdot dt \\ \phi(t) = \frac{1}{R} \cdot \int v(t) \cdot dt \end{cases} \quad (3)$$

onde g representa o valor da aceleração gravítica em $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, e R representa o comprimento do fio em metros.

Note-se que a equação (1) corresponde à solução genérica da equação (3) para pequenos valores do ângulo de alongamento (ϕ).

No caso do pêndulo amortecido, as equações diferenciais do movimento do pêndulo são:

$$\begin{cases} v(t) = -\int \left(g \cdot \sin \phi(t) + v(t) \cdot \frac{\kappa}{m} \right) \cdot dt \\ \phi(t) = \frac{1}{R} \cdot \int v(t) \cdot dt \end{cases} \quad (4)$$

onde κ representa o coeficiente de amortecimento em $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$.

A implementação de uma simulação com base num modelo físico pode ser considerada um problema de dinâmica directa. Pelo contrário, a utilização de um modelo físico de um sistema para determinação dos parâmetros a utilizar no seu controlo designa-se por dinâmica inversa.

3.2.3.1 Dinâmica directa

Um problema de dinâmica directa consiste na determinação das posições e velocidades a partir dos valores conhecidos para as forças e para os binários aplicados, como acontece na resolução do sistema de equações (4).

Uma vez que uma equação diferencial de movimento relaciona normalmente as forças e os binários aplicados com a velocidade ou a posição, a resolução de um problema de dinâmica inversa consiste genericamente na resolução da equação diferencial de movimento que descreve o sistema, em ordem à posição. Isto resulta em geral numa integração dupla não linear.

Nos sistemas de simulação, a resolução das equações diferenciais de movimento em ordem à posição pode ser efectuada por integração numérica. De entre os vários métodos de integração numérica conhecidos, a integração rectangular é o mais utilizado nos sistemas de simulação graças à sua simplicidade. Nos sistemas de simulação em tempo real, o método de integração rectangular apresenta também a vantagem de não necessitar de valores futuros da função a integrar, o que poderia levar à introdução de atrasos na simulação.

Independentemente do método de integração seleccionado, a precisão da integração numérica está sempre dependente do período de integração utilizado. Este tem de ser escolhido em função das taxas de variação das funções envolvidas e da precisão necessária, de modo a não comprometer nem a validade dos resultados obtidos nem o tempo de processamento envolvido.

3.2.3.2 Dinâmica inversa

É também possível resolver as equações de movimento em ordem às forças e aos binários aplicados, em função da trajectória ou da posição final pretendida. Desta forma, é possível determinar as forças e os binários que deveriam ser aplicados a um objecto para produzir um determinado movimento. Basta, para tal, obter a segunda derivada da trajectória que corresponde ao vector de acelerações, e aplicá-lo na equação diferencial do movimento do objecto respectivo.

Em robótica, são comuns as aplicações deste tipo de resolução das equações dinâmicas. É frequente a necessidade de serem calculados os binários necessários para movimentar um robot segundo uma determinada trajectória. Em animação, o objectivo é normalmente a determinação do movimento e, por esta razão, quando este é já conhecido, não existe necessidade aparente de serem calculadas as forças e os binários que o produzem. No entanto, a determinação destas forças e binários pode ser justificável para garantir que a trajectória especificada é fisicamente possível face às características dinâmicas do sistema. Isto acontece frequentemente quando se utilizam modelos de simulação híbridos, com componentes cinemáticas em conjunto com partes dinâmicas. A resolução da equação dinâmica inversa pode também ser necessária quando a trajectória não corresponder a uma especificação do preparador humano, mas surgir por sugestão de um modelo comportamental. Nestes casos é necessário obter os parâmetros de controlo correctos, que permitam o cumprimento da trajectória sugerida pelo modelo comportamental.

3.2.4 Modelos Comportamentais

Nos últimos anos a modelação comportamental tem realizado progressos no sentido de se conseguirem elementos auto-animados que reagem adequadamente aos estímulos ambientais percebidos. Estes modelos têm revelado como as animações complexas podem ser implementadas com um esforço mínimo por parte do preparador, limitando-se este a descrever o comportamento desejado para os actores através de modelos, e a especificar os objectivos a perseguir. Esta associação de actores com um modelo comportamental e um conjunto de objectivos designa-se por agente autónomo.

Um agente autónomo é um elemento que possui um determinado número de objectivos a cumprir num ambiente dinâmico e complexo. Considera-se autónomo porque possui os seus próprios mecanismos de percepção e de interacção com o ambiente envolvente e a capacidade para decidir quais as acções a tomar para atingir os seus objectivos [Franklin96].

A tarefa de decidir qual a melhor acção a tomar é complexa, devido a diversas razões:

- Devido a limitações na implementação de sensores, a percepção do ambiente envolvente pode ser incompleta, levando à tomada de decisões erradas ou não óptimas.
- A interacção entre dois ou mais objectivos concorrentes pode facilmente levar o agente autónomo a menosprezar um dos objectivos ou, alternativamente, a oscilar entre as direcções de satisfação de cada um deles.

- Por vezes um objectivo importante pode ser inatingível. Nestes casos, a sua perseguição deve ser evitada, uma vez que não conduz a um aumento de satisfação. Esta capacidade de desistência da procura de um objectivo requer considerações complexas e por vezes longínquas.
- Para implementar agentes autónomos competentes, todos estes e outros problemas devem ser satisfatoriamente resolvidos.

3.2.5 Modelos Cognitivos

Recentemente, foi ainda identificado, por alguns autores, um nível superior de modelação designado por modelação cognitiva. Os modelos cognitivos sobrepõem-se aos modelos comportamentais no facto de considerarem e controlarem o conhecimento do elemento autónomo e a forma como esse conhecimento é adquirido, mantido e utilizado no planeamento das acções [Funge98]. Os modelos cognitivos são potencialmente aplicáveis no controlo de agentes com elevado grau de autonomia e realismo, quase inteligentes, em aplicações onde o realismo da simulação de seres vivos seja considerado fundamental.

Como foi abordado nas secções 3.1.1.4 e 3.1.1.5, os processos de aquisição e de manutenção do conhecimento sobre o mundo envolvente têm uma importância crucial na tarefa de condução de veículos. Por este motivo, a modelação cognitiva apresenta-se como a alternativa mais promissora em termos de realismo para a implementação de modelos de condutores destinados a simuladores de condução. A opção por este tipo de modelação daria origem a modelos com uma estrutura interna muito semelhante à apresentada na figura 27 para o condutor humano de veículos reais.

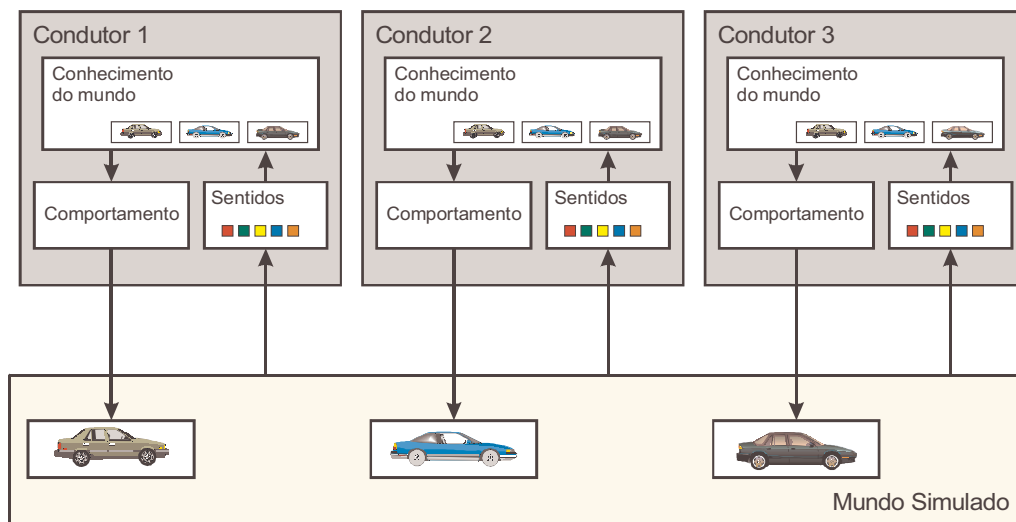


Figura 32. Estrutura de um sistema multi-agente utilizando modelação cognitiva

Nesta estrutura, o bloco de conhecimento do mundo corresponde a uma representação do estado do mundo, da maneira como ele é conhecido pelo condutor. Este estado do mundo é atualizado pelos sensores, modelados de forma a corresponderem aos sentidos humanos, e

por simulação, quando os acontecimentos que ocorrem no mundo não forem observáveis. Uma vez que os pontos de observação, os sentidos e as expectativas variam de condutor para condutor, a implementação de um conjunto de veículos autônomos obrigaria à utilização de um bloco de conhecimento do mundo distinto para cada condutor do conjunto de veículos considerado, cada um capaz de realizar uma simulação independente da sua representação interna do mundo, conforme se apresenta na figura 32.

Mesmo utilizando modelos simplificados para realizar estas simulações internas aos modelos cognitivos, o número de simulações necessárias poderia crescer com o quadrado do número de elementos autônomos, tornando este tipo de modelos desadequado à simulação de populações numerosas em tempo real. No caso limite de serem também utilizados modelos cognitivos para a actualização do estado das representações internas existentes no conhecimento do mundo de cada elemento autônomo, o conjunto poderia tornar-se insolúvel devido à eventual ocorrência de recursão infinita.

3.3 Controladores em anel fechado

Os controladores automáticos em anel fechado são utilizados desde há vários anos no controlo de sistemas industriais. Estes controladores baseiam-se na comparação de um valor de realimentação da grandeza a controlar com um valor de referência, para accionarem, em conformidade, o sistema controlado [Ogata70]. Um sistema em anel fechado pode ser esquematizado num diagrama de blocos conforme se apresenta na figura 33.

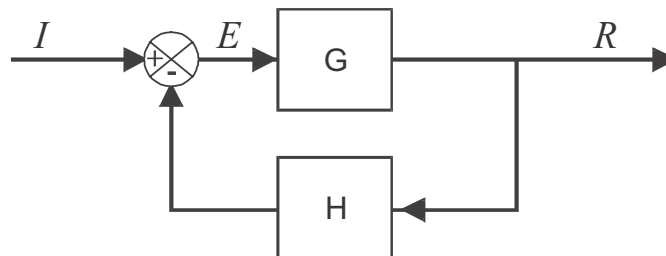


Figura 33. Esquema de um sistema em anel fechado

Para descrever as funções de transferência de sistemas utilizam-se vulgarmente transformadas de Laplace, de forma a simplificar o tratamento de expressões diferenciais [Kreyszig88]. Um sistema como o esquematizado na figura 33 apresenta uma função transferência dada por:

$$\frac{R(s)}{I(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad (5)$$

Para controlar um sistema deste tipo podemos considerar que é colocado um novo módulo **C** dentro do anel, conforme se apresenta na figura 34, de forma a variar a função de transferência.

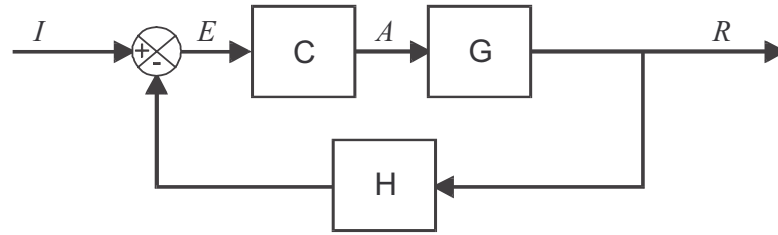


Figura 34. Sistema em anel fechado com elemento controlador

Neste caso a função transferência do conjunto ficaria:

$$\frac{R(s)}{I(s)} = \frac{C(s) \cdot G(s)}{1 + C(s) \cdot G(s) \cdot H(s)} \quad (6)$$

Um dos controladores mais vulgares consiste num elemento que conjuga acção proporcional com acção derivativa e acção integral, e que se designa por Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID). O módulo **C** designa-se por controlador PID se a sua função transferência for do tipo:

$$A(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int e(t) \cdot dt \quad (7)$$

ou, utilizando transformada de Laplace:

$$A(s) = E(s) \cdot K_p \cdot \left(1 + T_d \cdot s + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (8)$$

A figura 35 representa, de acordo com a expressão obtida, o diagrama de blocos de um controlador PID.

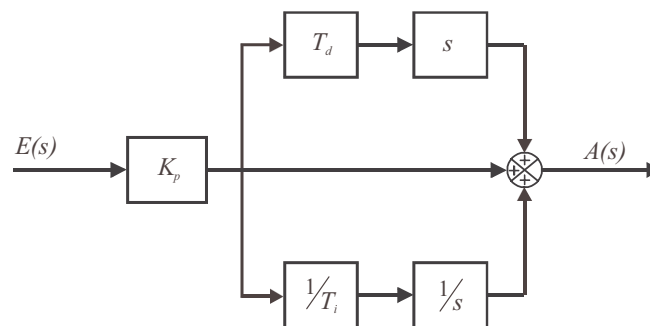


Figura 35. Diagrama de blocos de um controlador PID

Seleccionando os valores adequados para os parâmetros de controlo K_p , T_d e T_i , é possível afinar o sistema para reagir a uma variação da entrada em degrau com saídas de qualquer um dos tipos apresentados na figura 36.

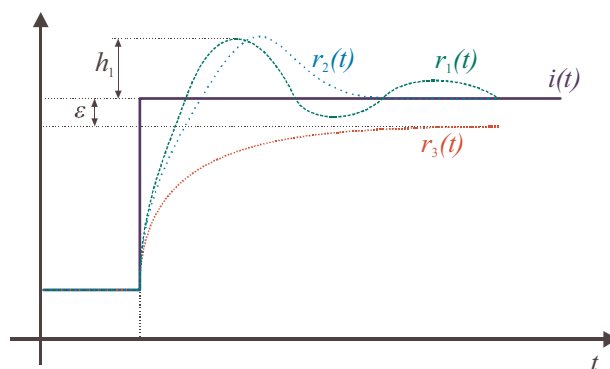


Figura 36. Respostas típicas possíveis de um sistema controlado

Em qualquer bibliografia sobre sistemas de controlo é possível encontrar metodologias matemáticas que permitem garantir a estabilidade do sistema e determinar os valores ideais para os parâmetros de controlo, de modo a minimizar o desvio em regime permanente (ε), limitar o *overshoot* na resposta a degraus (h_1), e diminuir o tempo de resposta [Ogata70]. No entanto, quando se pretendem controladores capazes de imitar as acções de controlo realizadas por humanos, os objectivos que dirigem a selecção dos parâmetros deixam de ser a obtenção de um controlo óptimo. Pode ser demonstrado que a existência de um *overshoot* é uma das características típicas de um controlo realizado por acção humana.

3.4 Agentes autónomos em ambientes reais

O uso de robots móveis em ambientes industriais começou a tornar-se realidade em meados da década de 1960. Desde então o número de robots instalados não tem parado de aumentar. As suas capacidades também evoluíram desde os simples dispositivos de transporte e colocação de peças até às novas gerações de sistemas robóticos competentes e com capacidade de decisão. A robótica tornou-se uma vasta área científica que integra trabalhos de investigação e desenvolvimento em muitos tópicos que se relacionam com este trabalho, tais como a percepção, o processamento do conhecimento, o planeamento, a aprendizagem, a mecânica, o controlo, a cinemática e a dinâmica.

Uma análise exaustiva de cada um destes tópicos cai fora do âmbito desta dissertação, pelo que esta secção será restringida essencialmente aos trabalhos de aplicação destas tecnologias ao controlo de veículos autónomos terrestres, e especialmente os destinados à condução de veículos automóveis em vias públicas.

Tradicionalmente, os veículos robotizados têm sido concebidos para operarem em ambientes industriais fechados. Nestes ambientes são normalmente impostas regras rígidas para a convivência entre os diversos veículos robotizados que possam existir, e entre estes e os humanos. Para além disso, é vulgar a necessidade de implementação de infra-estruturas de apoio como barreiras de protecção, guias, docas, etc.

A alteração do ambiente onde os veículos robotizados operam, para o exterior do ambiente fabril, impõe várias dificuldades adicionais. Um veículo destinado a operar no mundo

exterior poderá ter de conviver com outros veículos cujo comportamento pode ser ditado por regras muito diferentes das suas e, eventualmente, desconhecidas. Mesmo nos ambientes das vias públicas de comunicação, onde imperam regras superiormente impostas como o código da estrada, são vulgares as situações de incumprimento destas regras por parte dos veículos envolvidos. Uma condução competente de veículos numa via pública exige portanto a tomada constante de precauções contra os possíveis comportamentos imprevisíveis e ilegais por parte dos outros veículos.

Estamos ainda distantes da época em que a condução automatizada de veículos na via pública será vulgarizada. Não existem sequer certezas quanto às metodologias e normas que serão utilizadas na implementação dos controladores destes veículos. Existem no entanto algumas abordagens de trabalhos que têm vindo a ser investigadas nos últimos anos. Algumas destas abordagens conhecidas admitem a necessidade de implementação de certas infra-estruturas adicionais nas vias rodoviárias, de forma a facilitar a comunicação e a percepção dos veículos envolvidos, tal como acontece vulgarmente nos ambientes industriais utilizados por veículos robotizados.

Nesta secção apresentam-se algumas destas abordagens, como as destinadas à implementação de auto-estradas automatizadas, e alguns dispositivos de auxílio ao condutor como os controladores de velocidade de cruzeiro.

3.4.1 Controlo de velocidade de cruzeiro

Os controladores de velocidades de cruzeiro são dispositivos que se encontram em grande parte dos veículos automóveis de alguns países como os EUA. Estes dispositivos permitem manter uma velocidade seleccionada pelo condutor, libertando-o assim da tarefa de controlo de aceleração. A sua utilização é no entanto prejudicada pela existência de congestionamentos que impedem a manutenção da velocidade seleccionada durante períodos longos.

Conceptualmente, um controlador de velocidade de cruzeiro pode ser visto como um controlador em anel fechado que acciona o pedal do acelerador em função de um erro de velocidade obtido pela diferença entre a velocidade desejada e a velocidade actual. Desempenha portanto uma das tarefas da condução apontadas como pertencendo ao nível operacional na secção 3.1.1. No entanto, uma vez que não previne colisões frontais, um controlador de velocidade de cruzeiro não pode ser considerado um controlador operacional longitudinal completo.

Estes dispositivos utilizam um sensor de velocidade e um elemento de memória (**Mem**) controlado pelo condutor, interligados como se indica na figura 37. Quando o condutor pretende accionar o controlador de velocidade de cruzeiro, coloca-se na velocidade desejada e acciona o elemento de memória, através do comando **Set**. O dispositivo mantém-se então em monitorização da velocidade do veículo (v) que é depois comparada com a velocidade desejada que se encontra memorizada. O elemento controlador (**PID**)

reage depois a qualquer desvio detectado na velocidade, no sentido de efectuar a sua correcção.

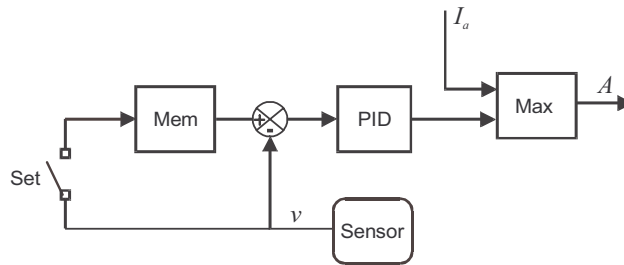


Figura 37. Controlador de velocidade de cruzeiro

Enquanto o dispositivo de controlo da velocidade de cruzeiro se encontra activo, o condutor mantém a possibilidade de acelerar o veículo através da simples pressão do acelerador (I_a), como acontece normalmente. A retirada de serviço do dispositivo de controlo da velocidade de cruzeiro acontece por ordem expressa do condutor ou sempre que este utilize o pedal de travagem.

3.4.2 Controlo de cruzeiro adaptativo

O controlador de cruzeiro adaptativo (ACC) foi concebido como um dispositivo de auxílio do condutor que amplia as capacidades oferecidas pelo controlador de velocidade de cruzeiro convencional, permitindo uma utilização alargada a uma maior gama de situações de tráfego.

Este sistema integra um controlador de cruzeiro convencional com um sensor adicional que é colocado na frente do veículo de forma a monitorizar a distância para o veículo da frente. O controlo de aceleração é agora realizado tendo em conta não só a velocidade seleccionada pelo condutor mas também uma distância desejada para o veículo da frente. Um controlador de cruzeiro adaptativo pode portanto ser considerado como um exemplo de um controlador operacional longitudinal.

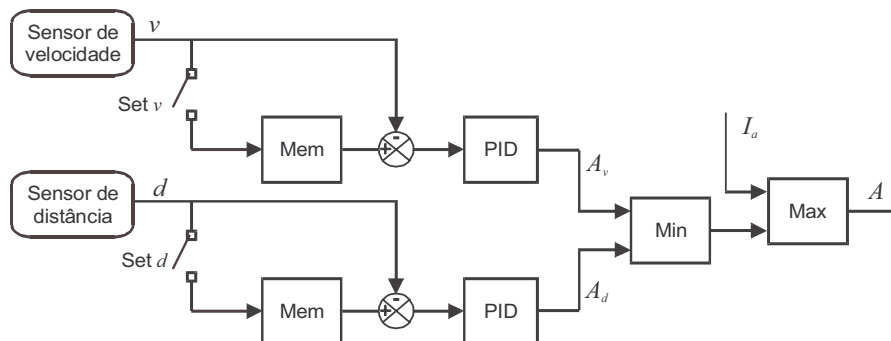


Figura 38. Controlo de cruzeiro adaptativo

A utilização destes controladores de distância ainda não está disponível para o público em geral nos veículos automóveis convencionais. No entanto há já estudos teóricos de

comportamento dinâmico destes dispositivos e ensaios de campo realizados com condutores humanos em circuitos de teste. Em [Fancher98] descreve-se uma implementação de um controlador de distância adaptativo e apresenta-se um ensaio experimental do sistema em situação real.

Existem ainda propostas de interface destes sistemas com o condutor, tendo em vista o estabelecimento de normas. Em [Serafin96] descrevem-se experiências de condução, nas quais diversas alternativas de interface entre estes dispositivos e o condutor foram experimentadas e avaliadas por um grupo significativo de condutores.

3.4.3 Prevenção de colisões

Os sistemas de prevenção de colisões (*CAS - Collision avoidance Systems*) são dispositivos que se destinam a ajudar o condutor, avisando-o da presença de situações de perigo. Embora não possam ser considerados como verdadeiros sistemas de controlo, a concepção dos mesmos utiliza estratégias semelhantes aos controladores operacionais em vários tópicos, nomeadamente ao nível da percepção de obstáculos e na definição de margens de segurança.

Os sistemas de prevenção de colisões mais vulgares implementam apenas uma vigilância longitudinal, monitorizando a distância para o veículo da frente. As estratégias de detecção de situações críticas para activação do sinal de aviso baseiam-se normalmente na determinação do tempo para a colisão (*TTC - time to collision*), e na sua comparação com a margem de segurança predefinida. O tempo para a colisão pode ser definido como:

$$TTC = \frac{d}{v_f - v_l} \quad (9)$$

onde:

d representa a distância para o veículo da frente,

v_f representa a velocidade do veículo perseguidor e

v_l representa a velocidade do veículo perseguido.

Para a margem de segurança utilizam-se normalmente valores entre 1.0 e 5 segundos.

Em [Horst94] discutem-se diversas estratégias de detecção de situações críticas para activação de sistemas de prevenção de colisões e sugerem-se valores para o intervalo de segurança, tanto em condições de boa como de má visibilidade.

Em [Janssen93] são analisadas várias alternativas de concepção de sistemas de prevenção de colisões, e apresenta-se a sua avaliação experimental em utilização simulada e real. As diversas alternativas consideradas diferem tanto na estratégia de detecção da situação crítica como no tipo de sinal utilizado para avisar o condutor. De entre as diversas recomendações resultantes deste estudo, destaca-se a sugestão de cálculo do tempo para a colisão (*TTC*) utilizando também as acelerações ou desacelerações dos veículos envolvidos.

Em [Schumann92] descreve-se um estudo exploratório, realizado num simulador de condução, sobre as implicações para o condutor da utilização de dispositivos de prevenção de colisões. Nestas experiências foram avaliados dispositivos de aviso do condutor utilizando retorno de força, como volantes e aceleradores activos.

3.4.4 Veículos inteligentes

Integrando num mesmo veículo um controlador operacional longitudinal e um controlador lateral, capaz de afectar a direcção de forma a manter a posição do veículo no centro da via, obtém-se um veículo inteligente. As implementações funcionais existentes de veículos deste tipo constituem apenas protótipos experimentais, e realizam somente as tarefas associadas ao nível operacional da condução.

Prevendo soluções de utilização em que o condutor de um veículo poderá optar por ligar ou desligar o controlador automatizado, em [Bloomfield98] descreve-se uma experiência realizada num simulador de condução destinada a analisar os efeitos provocados, no desempenho da condução, pela utilização de controladores automatizados de velocidade, de distância e de direcção.

[Koller94] apresenta um controlador operacional da posição lateral e longitudinal de um veículo, baseado na análise de um par estereoscópico de imagens. O sistema foi testado em laboratório utilizando imagens reais, demonstrando um bom desempenho. Não são conhecidos ensaios deste sistema em ambiente real.

Em [Wellman95] apresentam-se sugestões de aplicação de teorias da decisão e de modelos probabilísticos ao controlo de alto nível de veículos automatizados. Estes modelos foram testados no controlo de veículos autónomos num simulador de condução.

Um exemplo representativo de um veículo destinado a vias públicas conduzido autonomamente é o *Navlab*, desenvolvido na Universidade Carnegie-Mellon, em Pittsburgh. O *Navlab I* foi construído em 1986 para servir de plataforma experimental a sistemas de visão e de navegação. Baseava-se num veículo comercial ao qual foi adicionado um conjunto de sensores que incluía câmaras de vídeo, GPS, sonar, laser e outros. As diversas versões dos veículos *Navlab* têm demonstrado a adequação de algumas tecnologias de controlo à condução automatizada e segura de veículos automóveis em vias públicas.

Em 1995, o *NavLab 5* conduziu autonomamente 98 % da distância de 4480 Km entre Washington D.C. e San Diego, em vias públicas abertas ao tráfego normal e sem infra-estruturas especializadas. Esta demonstração de maturidade poderia levar a pensar que o problema da condução automatizada de veículos em vias públicas se encontra totalmente resolvido. No entanto, durante os períodos em que o *Navlab* se movimentou autonomamente apenas realizou processamento de controlo de baixo nível. O *Navlab 5* não possuía capacidade para decidir nem efectuar mudanças de faixa e, muito menos, ultrapassagens. Todas as manobras de entrada e saída em auto-estradas, alterações de faixa, etc., foram realizadas por condutores humanos. O valor de 98 % refere-se portanto

unicamente à distância percorrida e não revela o trabalho efectivo de condução que seria muito menos significativo.

O controlador operacional utilizado, designado por ALVINN, era baseado numa rede neuronal com 30x32 elementos de entrada [Pomerleau95]. Em fase de ensaio estão actualmente outras implementações de controladores operacionais e algumas implementações de controladores tácticos. Uma das mais recentes utiliza um conjunto de objectos de raciocínio independentes, cada um dedicado a uma entidade relevante do tráfego envolvente [Sukthankar96].

A mesma plataforma tem também sido utilizada em experiências de navegação em todo-o-terreno [Brumitt92]. Este tipo de navegação é mais exigente em termos mecânicos, mas bastante mais simples em termos tácticos. As considerações de ordem táctica resumem-se ao desvio dos obstáculos que, face às velocidades utilizadas nestes sistemas todo-o-terreno, podem ser considerados como fixos.

3.4.5 Auto-estrada automatizada

As auto-estradas automatizadas têm vindo a ser concebidas como vias de comunicação onde todos os veículos são conduzidos de forma automática desde que entram e até que abandonam a auto-estrada, intervindo o condutor humano apenas nas fases de entrada e de saída da mesma. Espera-se que este tipo de via de comunicação entre em exploração dentro de poucos anos e contribua para a diminuição do número de acidentes nas auto-estradas e para o aumento de rentabilidade das mesmas.

Estão actualmente definidas duas grandes abordagens para a implementação de auto-estradas completamente automatizadas [Casey98]. A primeira abordagem utiliza uma estrutura de controlo hierárquica e assenta no conceito de pelotão de veículos. Nesta abordagem assume-se que a informação possa fluir entre os diversos veículos de um mesmo pelotão, de forma a implementar um controlo hierarquizado.

Uma outra abordagem considerada mais simples em termos de implementação é baseada no conceito de veículos autónomos. Cada um destes veículos é tratado como um agente autónomo isolado, capaz de tomar internamente as decisões que determinam o seu comportamento futuro, baseado em informações recolhidas através dos seus sensores locais. Embora possa comunicar pontualmente com os seus vizinhos, um veículo autónomo não fica dependente destas trocas de informação para um desempenho satisfatório da sua actividade de condução. Esta abordagem de veículos autónomos destinados a auto-estradas automatizadas difere dos veículos inteligentes apresentados na secção 3.4.4 pelo facto de se admitir que o veículo necessita de recolher alguma informação estática disponibilizada pela infra-estrutura rodoviária para se tornar autónomo.

Na abordagem das auto-estradas automatizadas por controlo hierárquico, os comandos de controlo são difundidos pelos níveis mais altos da hierarquia e os veículos não necessitam de tomar decisões de nível médio ou alto, ou seja, a estrutura hierárquica controla os veículos. Desta maneira as decisões tácticas e estratégicas podem ser tomadas com grande

conhecimento da situação, uma vez que os níveis superiores podem recolher informações de todos os elementos inferiores. Na abordagem das auto-estradas automatizadas por veículos autónomos, cada veículo necessita de recolher as informações importantes para a sua condução.

Existem ainda abordagens mistas que utilizam uma aproximação do tipo veículo autónomo como dispositivo de segurança para o caso de a aproximação de controlo hierárquico falhar.

Uma boa descrição do estado de desenvolvimento das auto-estradas automatizadas e as perspectivas futuras da sua implementação pode ser encontrada em [Ünsal97].

3.5 Agentes autónomos em ambientes virtuais

A possibilidade de inclusão de participantes autónomos foi já identificada como uma das maiores necessidades para o realismo de qualquer simulação visual interactiva [Zyda94]. Nesta secção abordam-se alguns trabalhos de desenvolvimento de agentes autónomos destinados a ambientes virtuais, não incluindo os simuladores de condução. A maioria destina-se à animação de humanos virtuais ou de outras criaturas.

Uma excelente descrição do estado da arte de desenvolvimento de agentes realistas em ambientes virtuais pode ser encontrado em [Terzopoulos99]. Em [Cremer94] e [Chenney98] podem-se encontrar descrições de arquitecturas e de implementações de infra-estruturas destinadas a suportar simulações dos fenómenos físicos mais frequentes em ambientes de realidade virtual como, por exemplo, a força gravítica. Sistemas deste tipo utilizam modelos físicos de simulação, como os referidos na secção 3.2.3, de forma a permitirem uma rápida especificação de ambientes com movimentos fisicamente correctos. Técnicas de simulação dinâmica são também utilizadas para aumentar o realismo oferecido pelas figuras humanas ou por outras criaturas destinadas à vida em ambientes virtuais [McKenna90] [Bruderlin89] [Hodgins95] [Girard85], através da modelação dos fenómenos físicos envolvidos nos seus movimentos.

Nos últimos anos têm-se multiplicado os esforços no sentido de conseguir agentes autónomos baseados em modelos comportamentais como os referidos na secção 3.2.4. Estes destinam-se normalmente à simulação do comportamento de humanóides [Wildberg96], de animais [Tu94] ou de outras criaturas. Este tipo de modelos permite obter animações muito realistas e facilita o povoamento de cenários complexos, mas prejudica a implementação de situações concretas. A necessidade de prever metodologias para controlo dos agentes autónomos presentes num ambiente virtual é apontada em [Blumberg95].

Alguns trabalhos no sentido de criar infra-estruturas de suporte ao desenvolvimento, especificação e controlo de agentes autónomos genéricos para ambientes virtuais, têm sido realizados nos últimos anos [Perlin94] [Maes95]. Em [Bruderlin95] propõe-se a aplicação de técnicas de processamento de sinal e imagem a definições geométricas de movimentos de figuras articuladas, de forma a que estes possam ser modificados e controlados.

Em [Rousseau98] apresenta-se um modelo comportamental de humanóides, designado por socio-psicológico. Os actores baseados neste modelo são capazes de se relacionar uns com os outros e de exibir atitudes personalizadas. O realismo comportamental é também a preocupação do trabalho apresentado em [Bates92] que equaciona a simulação das emoções típicas dos seres vivos para influenciar o comportamento de criaturas virtuais.

Na secção 3.5.1 referem-se algumas técnicas utilizadas na criação de elementos autónomos em jogos de computador interactivos. Em função da importância para o trabalho desenvolvido, os agentes autónomos destinados a simuladores de condução serão abordados em separado, na secção 3.6.

3.5.1 Jogos

Os jogos de computador são, desde o tempo dos simples jogos bidimensionais, uma das áreas mais activas no desenvolvimento e na aplicação de técnicas de animação. São vários os casos de aplicação de técnicas de animação dinâmica, como por exemplo os jogos baseados em manifestações desportivas como o ténis e o golfe. Neste jogos o movimento da bola é simulado a partir de modelos dinâmicos que levam normalmente em consideração parâmetros como o vento, a força da gravidade e o atrito.

É no entanto no campo da implementação de agentes autónomos baseados em comportamento que os jogos se tornam mais significativos [Funge99]. Dependendo do tipo de jogo e do ambiente em que este decorre, os agentes autónomos são utilizados para a implementação de monstros, espíritos, criaturas, amigos ou inimigos. A existência de opositores autónomos é mesmo considerada fundamental para a concretização de alguns jogos destinados apenas a um jogador.

Mesmo em alguns jogos mais antigos, como o famoso *Packman*, eram utilizados “monstros”, cujo comportamento era preparado para perseguirem a criatura do jogador. Embora simples, estes elementos autónomos eram movimentados a partir de modelos comportamentais. Em jogos com o *Doom*, os humanóides autónomos desempenham um papel fundamental no jogo, uma vez que representam as principais dificuldades a ultrapassar. Nos jogos de condução automóvel, os veículos adversários são também fundamentais para a obtenção de ambientes competitivos interessantes.

Em [Smith99] são estabelecidas as características fundamentais que os elementos autónomos devem possuir para maximizarem o interesse oferecido por um jogo interactivo. Algumas técnicas de implementação de criaturas inteligentes nos jogos são abordadas em [LaMothe95].

3.6 Agentes autónomos em simuladores de condução

Nesta secção são justificadas as necessidades dos simuladores de condução em termos de agentes autónomos e os requisitos que estes devem possuir para facilitar a especificação de ambientes de tráfego realista. São também referidas as soluções típicas que se podem

encontrar na maioria dos simuladores de condução com fins científicos e as possibilidades que oferecem.

3.6.1 Aplicações

Os veículos autónomos são um dos componentes fundamentais dos simuladores de condução. Nos simuladores com fins científicos, os veículos autónomos podem ser utilizados na implementação de tráfego ambiente e na implementação de veículos pré-programados. A presença de peões autónomos pode também ser fundamental para simulação de condução em ambientes urbanos ou para a implementação de situações específicas. Alguns simuladores consideram ainda cada conjunto de semáforos como sendo um agente autónomo.

3.6.1.1 Tráfego autónomo

Para que um simulador de condução seja convincente, é necessário que forneça ao condutor a sensação de imersão num ambiente típico das vias públicas. Para isso, é fundamental incluir os veículos autónomos que compõem o tráfego ambiente. Apesar de existirem modelos macroscópicos desenvolvidos especialmente para simulação de correntes de tráfego, uma simulação de condução exige o tratamento individual de cada um dos veículos que compõem o tráfego, utilizando uma simulação microscópica. Aproximações como considerar instantânea uma mudança de via, não são apropriadas para simuladores de condução interactivos.

Estas exigências em termos de nível de simulação e o grande número de veículos que é necessário considerar vão-se reflectir, como é evidente, num elevado peso de processamento, facilmente incompatível com as exigências da simulação em tempo real. Existe portanto a preocupação constante de obter modelos satisfatórios, mas tão leves quanto possível em termos de tempo de processamento.

3.6.1.2 Veículos pré-programados

Uma das mais úteis utilizações dos simuladores de condução é o estudo da reacção de condutores humanos quando submetidos a uma determinada situação de tráfego. Para isso, além dos veículos completamente autónomos que compõem o tráfego ambiente, é fundamental dispor de veículos controláveis que permitam criar o acontecimento que se pretende estudar.

Estes veículos devem ser controlados por um programa ou guião, constituído por uma sequência de comandos. Como será tratado na secção 3.6.3.2, é fundamental que estes comandos possam corresponder a ordens de diversos níveis de abstracção. Para além disso, de modo a permitir a implementação de situações rígidas, independentemente do desempenho do condutor humano, é importante que as ordens especificadas no guião possam ser desencadeadas de forma reactiva, como se explica na secção 3.6.3.3.

3.6.1.3 Semáforos

Os semáforos são normalmente controlados de forma sequencial, com tempos mais ou menos fixos, definidos durante a fase da sua implementação. Existem no entanto abordagens de controlo inteligente de tráfego que utilizam sensores de veículos para variarem interactivamente os estados dos sistemas de semáforos [Lin95].

Num simulador de condução, a implementação dos controladores de semáforos nos cruzamentos do ambiente rodoviário virtual pode também ser baseada em modelos comportamentais, de forma a potenciar a emulação dos controladores inteligentes de tráfego ou a permitir o ensaio experimental de novos algoritmos de controlo de tráfego. Por outro lado, num simulador de condução pode ser importante obter o controlo de um sistema de semáforo, não de forma realista, mas de maneira a provocar os acontecimentos que se pretende estudar.

É possível conceber situações de tráfego para cuja implementação possa ser adequada uma utilização de controladores de semáforos baseados em modelos comportamentais. Por exemplo a situação descrita pela afirmação

"Independentemente da velocidade a que vou, apanho sempre o sinal vermelho em todos os semáforos por onde passo.",

pode ser facilmente implementada por semáforos cujo objectivo principal é dificultar a vida ao sujeito e que reagem à posição do seu veículo de forma a cumprirem o objectivo proposto. É ainda possível conceber ambientes de cooperação entre sistemas de semáforos de modo a provocar situações caóticas, e imaginar um estabelecimento de relações sociais entre semáforos e veículos.

3.6.1.4 Peões

A presença de peões autónomos pode também ser fundamental para a simulação de condução em ambientes urbanos ou para a implementação de situações específicas em simuladores. Apesar das diferenças existentes nos tipos de tráfego respectivos, os requisitos que se põem aos peões autónomos nos simuladores de condução com fins científicos não são muito diferentes dos colocados aos veículos autónomos. As metodologias de implementação são também similares.

As maiores diferenças entre a implementação de peões autónomos e o desenvolvimento de veículos autónomos põem-se ao nível do modelo de animação exigido. Se no caso dos veículos autónomos pode ser identificado o nível táctico como o mais importante para o realismo da tarefa de condução, já no caso dos peões autónomos as decisões de nível táctico passam normalmente despercebidas, devido às menores velocidades e às maiores acelerações características do movimento dos peões. Por outro lado, a implementação de peões virtuais convincentes é muito mais exigente em termos da simulação física dos movimentos relativos dos membros. Nos simuladores de condução que disponibilizam peões virtuais autónomos, o movimento relativo dos membros dos peões não é simulado ou então é animado a partir de trajectórias predefinidas.

3.6.2 Aproximações existentes

No campo dos simuladores de condução existem diversos trabalhos realizados com o objectivo de simular os veículos autónomos que compõem o tráfego ambiente [Cremer97] [Bayarri96] [Gallimore96]. Estes trabalhos incidem sobretudo na concepção e optimização de controladores tácticos realistas para os veículos autónomos. Na maioria dos casos são utilizados decisores estratégicos simples, baseados em informação especificada pelo utilizador. Devido às limitações de desempenho, os modelos físicos são normalmente eliminados ou muito simplificados.

As implementações mais comuns dos controladores tácticos utilizam modelos baseados em máquinas de estados, ou mais especificamente em HCSM (*Hierarchical Concurrent State Machines*) ou HMM (*Hidden Markov Models*).

As máquinas de estados são sistemas que representam as diferentes fases de um contexto utilizando um conjunto de estados discretos. As tradicionais máquinas de estados, de nível único e não concorrentes, podem ser utilizadas para implementar sistemas de controlo associando uma acção a cada estado de funcionamento. Em cada instante, existe um único estado activo que define a acção a efectuar e controla o funcionamento do sistema. A alteração da acção de controlo é conseguida pela comutação do estado activo, utilizando transições.

Estas máquinas de estados tradicionais tratam os estados todos ao mesmo nível, e não prevêem métodos de agrupamento dos estados em blocos funcionais independentes. Esta falta de mecanismos de encapsulamento dificulta a organização de máquinas de estados de grandes dimensões e impede a partilha de código entre estados semelhantes. Por outro lado, a lógica sequencial inerente à falta de concorrência das máquinas de estados tradicionais dificultam a sua aplicação a problemas que exigem a atenção simultânea a aspectos diversos do ambiente envolvente.

As máquinas de estados concorrentes hierárquicas (HCSM) tentam resolver os problemas associados às máquinas de estados tradicionais através da organização hierárquica de estados que podem permanecer activados concorrentemente. Os modelos desenvolvidos tornam-se assim mais simples de programar, de modificar e de analisar do que os modelos correspondentes de máquinas de estados de nível único. Mais informações sobre HCSM e a sua aplicação ao controlo de veículos autónomos num simulador de condução pode ser encontrada em [Ahmad94].

Os HMM são utilizados para reproduzir acções de condução complexas a partir da observação do desempenho de condutores típicos nas mesmas acções. As acções complexas são descritas por sequências de acções elementares, cada uma correspondente a um estado mental interno do condutor. Um conjunto de probabilidades de transição pode ser utilizado para reproduzir as alterações de estados respectivos. No entanto, a observação da acção resultante de um condutor ou controlador automático, não permite determinar o estado interno completo nem todas as características de um modelo deste tipo. É necessário utilizar técnicas que permitem estimar os parâmetros internos do modelo a partir de um conjunto de

dados de treino recolhidos de vários condutores humanos. Uma abordagem de implementação e validação de tráfego autónomo num simulador de condução, utilizando modelos deste tipo, pode ser encontrada em [Fernandez96].

3.6.2.1 Controlo longitudinal

O controlo da posição longitudinal de um veículo é uma das tarefas do nível operacional de qualquer condutor. Esta tarefa pode consistir num simples controlo de velocidade, quando o veículo circula independente de obstáculos, ou num controlo de posição relativa face a um veículo ou obstáculo antecessor, sempre que ele exista. A figura 39 apresenta os parâmetros relevantes para o controlo longitudinal, quando o veículo a controlar segue atrás de outro veículo.

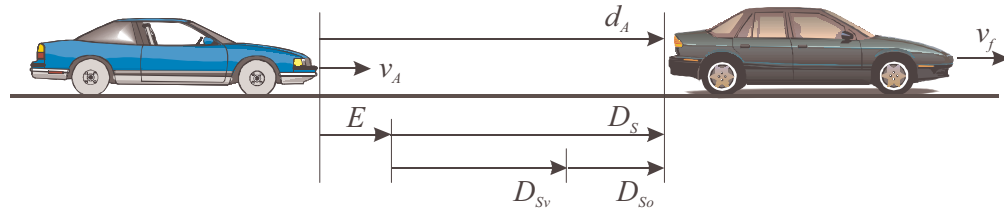


Figura 39. Parâmetros relevantes para o controlo longitudinal

O objectivo do módulo de controlo longitudinal é o de tentar minimizar tanto o desvio de posição (E) como o erro de velocidade (v_r) relativamente ao veículo precedente. O desvio de posição (E) pode ser definido como a diferença entre a distância actual para o veículo perseguido (d_A) e o valor pretendido para a mesma distância (D_S).

$$E = d_A - D_S \quad (10)$$

A distância pretendida para o veículo perseguido, que se designa por separação objectivo (D_S), pode ainda ser decomposta em duas parcelas: uma que representa a distância mínima entre os dois veículos (D_{So}) e uma outra, variável com a velocidade, que representa o espaçamento adicional de segurança em função da velocidade.

$$D_S = D_{So} + D_{Sv} \quad (11)$$

Normalmente considera-se que a componente da distância de segurança que depende da velocidade varia proporcionalmente com esta, de forma a manter constante o tempo em que é percorrida.

$$D_{Sv} = h \cdot v_A \quad (12)$$

Na expressão (12), h representa o tempo (em segundos) que o veículo perseguidor demora a percorrer a distância de segurança (D_{Sv}). Esta margem temporal de segurança é um parâmetro característico dos condutores ou controladores de veículos automóveis e diversos estudos avaliam o seu valor típico, para os condutores humanos, entre 1.2 e 4 segundos. No

caso dos controladores operacionais automatizados são normalmente utilizados valores mais baixos, que podem ser inferiores a 1 segundo.

O erro de velocidade é definido simplesmente como a diferença entre a velocidade do veículo e a velocidade do seu antecessor:

$$v_r = v_A - v_f \quad (13)$$

Algumas implementações de controladores longitudinais especificam o objectivo de controlo como sendo a manutenção a zero da soma do erro de velocidade com o desvio de posição afectado de um parâmetro k .

$$v_r + k \cdot E = 0 \quad (14)$$

Pode ser demonstrado que, independentemente do valor de k , para distâncias de segurança constantes e velocidades do veículo da frente também constantes, a igualdade expressa em (14) implica que ambas as parcelas sejam igualmente nulas.

$$v_r + k \cdot E = 0 \Rightarrow \begin{cases} v_r = 0 \\ E = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Desta forma, a partir do conhecimento do erro de separação (E), pode ser sugerida uma nova velocidade para o veículo perseguidor, de forma a satisfazer a equação (14).

O parâmetro k , designado por ganho do erro de separação, tem dimensões inversas do tempo e é uma constante positiva especificada no projecto do controlador. A selecção do valor deste ganho influencia a resposta do controlador e pode ser efectuada tendo em conta os requisitos de desempenho. A figura seguinte apresenta um gráfico velocidade-distância onde se traçou a recta correspondente ao lugar geométrico dos pontos que satisfazem a equação (14).

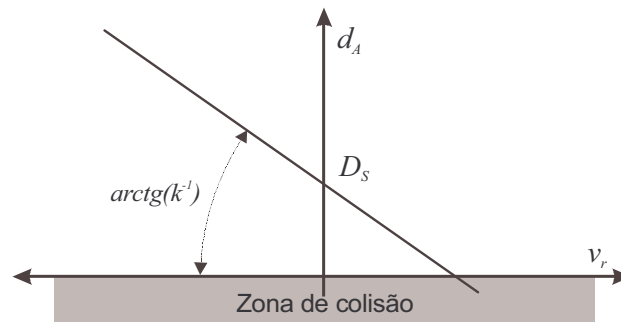


Figura 40. Recta dinâmica de resposta do controlador

O ganho do erro de separação determina a forma como o condutor compensa os desvios de posição com variações de velocidade de sentido contrário. Isto é, se a distância para o veículo da frente se apresentar muito grande (E positivo), o condutor reage com um

aumento de velocidade do seu veículo, no sentido de tornar negativa a velocidade relativa do veículo da frente e assim tentar manter a igualdade (14). Este aumento de velocidade será tanto maior quanto maior for o ganho do erro de distância k . Valores muito elevados de k podem levar o sistema à instabilidade, pois podem provocar uma saturação dos actuadores, ou uma compensação que inverta o sinal do erro de posição no intervalo de tempo considerado.

A afectação da velocidade do veículo perseguidor com o valor determinado directamente a partir da expressão (14) resulta num controlador em anel fechado, do género dos apresentados na secção 3.3, mas para o qual apenas é utilizada a componente proporcional. Para além das deficiências apontadas aos controladores deste tipo, estas soluções podem produzir resultados irrealistas uma vez que a velocidade pode variar rapidamente de forma quase ilimitada.

3.6.3 Requisitos

Para que a sua utilização seja vantajosa no âmbito da preparação de ambientes de condução simulada, a concepção dos elementos autónomos deve permitir, por exemplo, uma replicação fácil de uma especificação a um grande número de agentes. Por outro lado, para permitir a implementação dos veículos pré-programados, referidos na secção 3.6.1.2, é essencial que pelo menos alguns elementos da cena possam receber ordens de forma reactiva. Como se demonstra na secção 3.6.3.2, é vantajoso que estas ordens possam corresponder a diversos níveis de abstracção. Embora não sejam características fundamentais para os elementos autónomos de um simulador de condução, as capacidades de *online casting* e de perseguição de objectivos de grupo podem resultar em vantagens significativas para as tarefas de especificação de ambientes de condução simulada.

3.6.3.1 Facilidade de utilização de grande número de agentes

É normal que a encenação de uma experiência de simulação de condução possa necessitar de um grande número de actores autónomos. Em algumas experiências este número pode facilmente atingir várias dezenas. A especificação de um grande número de trajectórias ou desempenhos é um trabalho árduo e delicado que pode, no entanto, ser simplificado se a cena puder ser povoada por elementos autónomos com modelos comportamentais semelhantes, mas que vão reagir aos acontecimentos de tráfego envolvente da maneira esperada.

Por outro lado, a simulação em tempo real de um grande número de agentes pode ser computacionalmente pesada. É portanto necessário prever modelos comportamentais tão leves quanto possível, e utilizar técnicas de aceleração como as apresentadas na secção 3.7 ou como a técnica proposta na secção 5.2.

3.6.3.2 Possibilidade de ser comandado a diferentes níveis

Conforme foi referido na secção anterior, a disponibilidade de veículos virtuais com elevado grau de autonomia é fundamental para a boa eficiência das tarefas de preparação de

ambientes de condução simulada realista. No entanto, nos simuladores de condução destinados à realização de experiências científicas, a autonomia completa não é suficiente, pelo menos de forma generalizada a todos os elementos que povoam o cenário de simulação. Para permitir a implementação exacta das situações de tráfego a estudar, deve ser possível controlar pelo menos alguns dos elementos autónomos que povoam a cena. Isto pode ser conseguido pela possibilidade de transmitir comandos a determinados veículos, colocados em situações chave para a implementação das situações pretendidas. Para facilitar ainda mais o trabalho de preparação dos cenários, é vantajoso que estes comandos possam corresponder a ordens de diversos níveis de abstracção.

Por exemplo, um cão virtual autónomo deve poder receber ordens do tipo:

- Tens fome. Trata de arranjar maneira de satisfazeres as tuas necessidades.
- Vai ter com o teu dono que está do outro lado da rua.
- Levanta a pata dianteira do lado direito.

Da mesma forma, um automóvel autónomo (virtual ou não) deve poder receber ordens que, embora diferentes, correspondem a níveis idênticos de abstracção.

- Dirige-te para casa.
- Vira à direita na próxima rua.
- Trava.

Embora muitas vezes seja possível decompor uma ordem de alto nível em várias ordens de baixo nível, a possibilidade de impor objectivos de longo prazo permite normalmente uma redução do número de ordens necessárias para a implementação da situação desejada, diminuindo assim também o esforço exigido durante a preparação da experiência.

3.6.3.3 Possibilidade de desencadeamento de ordens de forma reactiva

As ordens transmitidas a um determinado veículo com o objectivo de provocar uma situação de tráfego pretendida são normalmente agrupadas sequencialmente num guião. No entanto, é fundamental que o instante de processamento de cada uma das ordens possa ficar dependente de eventos de tráfego seleccionados, mesmo quando não seja possível determinar, à partida, em que instantes estes vão ocorrer.

Um exemplo básico da necessidade de desencadeamento de ordens de forma reactiva é apresentado na figura 41. Nesta situação pretende-se que o veículo B avance em direcção ao cruzamento quando o veículo conduzido interactivamente (A) passar pela zona do sensor S. Esta situação é um exemplo de um controlo reactivo, uma vez que o momento em que o veículo B deve arrancar está dependente daquilo que outro veículo (sobretudo o conduzido interactivamente) possa fazer.

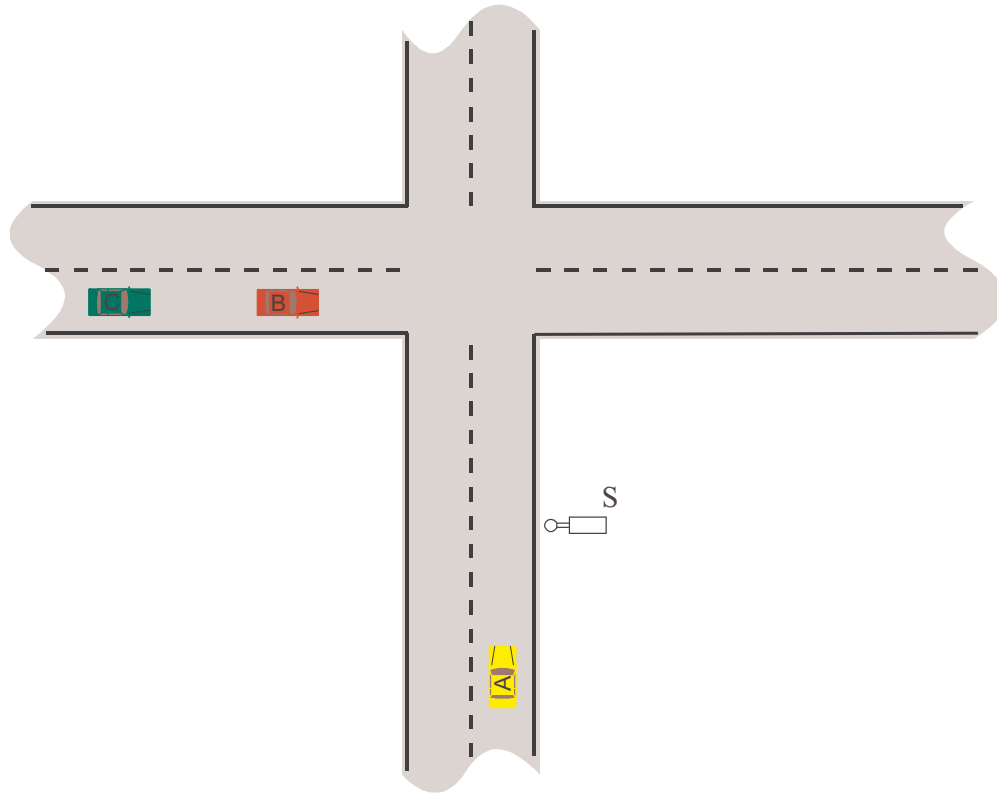


Figura 41. Comportamento reactivo de um veículo autónomo

3.6.3.4 On-line casting

A disponibilização da capacidade de *on-line casting* representa a possibilidade de seleccionar, em tempo real e de forma automática, quais os actores que vão cumprir as tarefas fundamentais para a implementação das situações pretendidas.

Apesar de não ser considerada fundamental para a preparação de experiências de simulação de condução, esta possibilidade tem vindo a ser identificada como uma facilidade importante que deve ser disponibilizada pelos simuladores de condução vocacionados para estudos científicos [Alloyer97a]. A existência da capacidade de *on-line casting* permite facilitar a preparação de experiências, uma vez que, fazendo uso desta capacidade, o preparador pode provocar a situação desejada através do controlo do agente que na altura certa se encontrar em melhor posição para cumprir a missão especificada. Desta forma, o preparador não necessita de se preocupar com toda a especificação da vida do agente controlado, até ao momento do cumprimento da missão.

Um caso típico de aplicação da funcionalidade de *on-line casting* é apresentado na figura 42. Pretende-se que, quando o veículo conduzido interactivamente (A) atingir o cruzamento, um veículo vindo da esquerda avance para o cruzamento com intenção de virar à esquerda, colocando-se no mesmo sentido que o veículo sujeito (A) e à sua frente. A implementação deste pequeno conflito exige que o veículo provocador esteja presente nas

proximidades do cruzamento quando o veículo sujeito atingir a posição de desencadeamento do conflito.

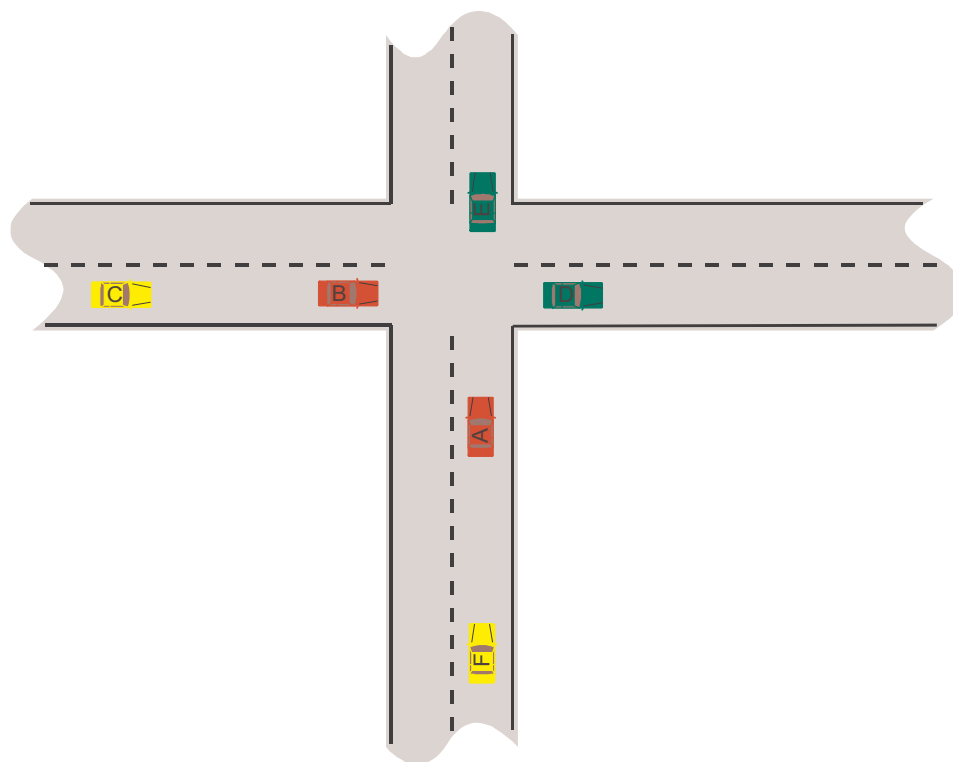


Figura 42. Exemplo de aplicação da funcionalidade de *online casting*

Utilizando a funcionalidade de *online casting*, o preparador pode especificar a acção provocadora do conflito sem a atribuir especificamente a nenhum dos veículos utilizados no ambiente rodoviário. Apenas é necessário prever a metodologia de selecção do veículo que vai ser encarregado de cumprir a acção provocadora. Desta forma, os movimentos de todos os veículos durante todo o tempo até que o veículo sujeito chegue à zona do cruzamento podem ser desencadeados de forma natural pelo comportamento próprio dos veículos que compõem o cenário.

3.6.3.5 Perseguição de objectivos de grupo

É fundamental que cada veículo possa também decidir as acções a tomar, tendo em conta a satisfação de objectivos de grupo. Estes objectivos podem ser sugeridos pelo preparador da experiência para, por exemplo, manter constante uma densidade de tráfego numa determinada via.

Numa situação como a representada na figura 43, o preparador da experiência pode impor um valor fixo para a densidade de tráfego na estrada B. Neste caso, cada um dos veículos que circulam pela estrada A, terá que optar entre continuar em frente pela mesma estrada (A), ou sair pela direita para a estrada B. Neste processo de decisão será considerado o

resultado da comparação da densidade de veículos que circulam pela estrada B com o valor desejado.

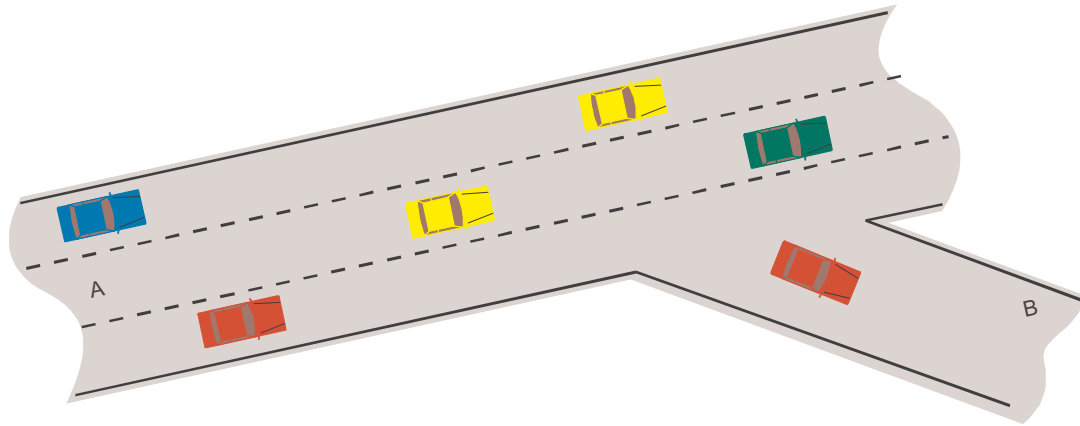


Figura 43. Imposição de densidade de tráfego pela especificação de objectivos de grupo.

Outro exemplo de aplicação de objectivos de grupo poderia ser a implementação da situação típica das estradas de vias múltiplas que se encontram saturadas, e que pode ser descrita pelo comentário:

"seja qual for a via que eu selecciono, a minha é sempre a que vai mais devagar".

Esta situação pode ser implementada pela atribuição, em tempo real, de objectivos de velocidade média aos grupos de veículos que circulam por uma mesma via, em função da via seleccionada pelo condutor humano.

Para que seja possível o cumprimento dos objectivos de grupo especificados, cada veículo terá que se assumir como parte de um grupo quando se verificam as condições para isso, e decidir as acções a tomar, de forma a perseguir também os objectivos do grupo onde está inserido.

3.7 Simplificação de comportamentos

Uma aplicação interactiva de simulação visual pode ser decomposta em dois processos fundamentais: a síntese de imagem, que se apoia normalmente em hardware dedicado e em técnicas como as referidas na secção 2.6, e a simulação, onde o estado dos elementos constituintes da cena é actualizado. Este último processo tende a tornar-se mais crítico com o aumento de complexidade dos ambientes virtuais e a qualidade da simulação dos elementos autónomos existentes. As vantagens oferecidas pela simulação comportamental destes elementos autónomos são normalmente obtidas à custa de uma maior utilização de recursos de processamento. Para não comprometer a taxa de actualização de imagem resultante, é indispensável manter o processamento requerido por cada um destes dois processos dentro dos limites comportáveis para o hardware a que se destinam.

Na secção 2.6.1 foram abordadas técnicas de selecção dos objectos que se encontram vulgarmente aplicadas nos processos de síntese de imagem. Muitas destas técnicas realizam uma selecção dos objectos a enviar para o hardware de geração de imagem em função da sua posição e particularmente da distância a que se encontram para o ponto de visualização. A ideia subjacente a estas técnicas é o facto de não ser necessário considerar, na síntese de imagem, os objectos que não são importantes para a imagem final. Estes podem ser puramente eliminados, substituídos por versões simplificadas, ou agrupados com outros numa representação de conjunto de nível superior. À parte os problemas referidos anteriormente, a decisão de quais são os objectos importantes para a imagem final é simples:

- Os objectos fora do volume de visualização são ignoráveis.
- Os objectos muito afastados do observador também não são normalmente importantes.

Esta segunda directiva, aplicada à selecção de objectos a utilizar no processo de síntese de imagem, resulta da constatação de que a importância dos objectos para imagem final varia inversamente com a distância ao ponto de observação. Quanto mais longe se encontra um objecto, menor será a área da imagem que este irá ocupar. Para objectos muito afastados, a área de imagem ocupada torna-se insignificante em função da resolução utilizada, tornando-se aceitável a não consideração do objecto.

Ideias semelhantes são também aplicadas nos processos de simulação dos sistemas que realizam as simulações (dinâmicas ou comportamentais) ou as animações, apenas dos objectos que se encontrem não muito longe do observador [Chrislip95]. Nestes sistemas, o número de objectos que vivem na cena é mantido dentro de limites aceitáveis pela destruição dos objectos que abandonam uma zona de proximidade do observador, quer devido ao movimento próprio, quer pelo deslocamento do ponto de observação. No entanto, nos casos em que os objectos possuem capacidade interna para abandonar a zona de proximidade do observador, é necessário prever meios externos que permitam a sua recolocação na zona de proximidade ou, alternativamente, a geração de novos objectos dentro da mesma zona.

Esta selecção de objectos sobre os quais é aplicada a simulação pode ou não ser independente da selecção de objectos potencialmente visíveis, que é efectuada no processo de síntese de imagem. As figuras 44 e 45 representam duas estratégias típicas para implementação das selecções de objectos nos processos de simulação e de síntese de imagem. Na estratégia representada na figura 44 recupera-se, da síntese de imagem, a tradicional selecção de objectos por distância ao observador e por inclusão na pirâmide de visualização, alargando-se a sua utilização também ao processo de simulação. Temos portanto o universo de objectos dividido em dois grupos distintos: o grupo dos objectos que não são visualizados nem simulados, e o grupo dos objectos que são visualizados e são também simulados.

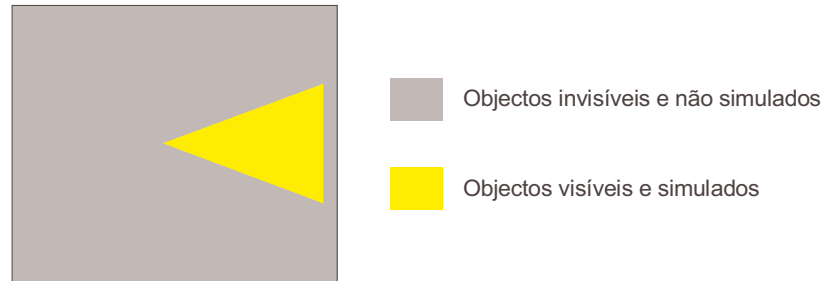


Figura 44. Selecção de objectos tradicional, aplicada à síntese de imagem e à simulação

Na estratégia representada na figura 45 mantém-se a tradicional selecção de objectos do processo de síntese de imagem, mas é realizada uma nova selecção de objectos, apenas com base na distância para o observador, destinada ao processo de simulação. Obtemos assim objectos que não são visualizados nem simulados, objectos que são visualizados mas que não são simulados, objectos que não são visualizados mas que são simulados, e objectos que são visualizados e simulados.

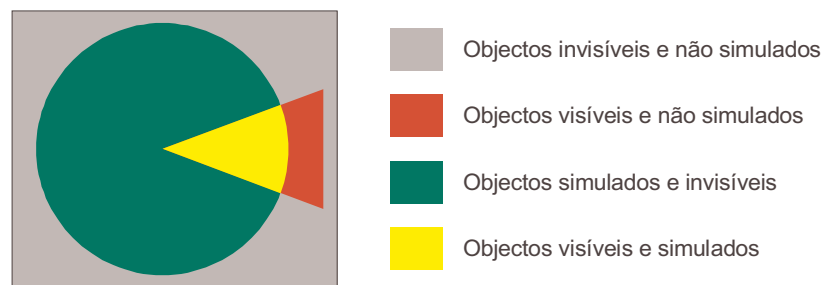


Figura 45. Selecção de objectos pela distância ao observador, aplicada à simulação

Independentemente da abordagem utilizada, estas duas técnicas de selecção dos objectos a simular em função da sua posição relativamente ao observador apresentam algumas deficiências, quando aplicadas ao processo de simulação comportamental.

- A falta de coerência no comportamento de longo prazo (comportamento estratégico) pode ocorrer e, em certos casos, ser notada pelo observador humano. Por exemplo, o observador pode manter uma expectativa de encontrar, à saída de um túnel, determinados elementos autónomos que viu anteriormente a entrar pelo outro extremo. A expectativa pode no entanto ser frustrada se os elementos autónomos forem destruídos no interior do túnel ou durante um período em que se encontravam mais afastados do observador.
- A especificação de ambientes com vários elementos autónomos torna-se por vezes demasiadamente trabalhosa, uma vez que se pode revelar fundamental impor um determinado comportamento a um determinado elemento antes de ele ter sido criado ou, alternativamente, impor de forma reactiva em que instante e em que local um novo elemento deve ser gerado. Esta dificuldade prejudica bastante a criação de ambientes virtuais realistas e pode implicar a utilização de uma maior quantidade de agentes para

povoar um determinado espaço [Blumberg95]. Esta constatação mostra-se especialmente relevante no caso dos simuladores de condução, onde a capacidade de especificação precisa de acontecimentos de tráfego é considerada fundamental para o sucesso das suas aplicações [Cremer97] [Leitão99b].

- Para que não sejam notados desaparecimentos inexplicáveis de objectos, os elementos autónomos não devem ser eliminados enquanto se encontram a distâncias do ponto de observação às quais ainda possam ser vistos. No entanto, para distâncias próximas do limiar de visibilidade, o comportamento de um elemento autónomo pode não ser perceptível e representa portanto um peso de processamento desnecessário.
- Como foi comentado para a técnica da variação do nível de detalhe geométrico, a eliminação de um grande número de pequenos objectos distantes pode implicar o desaparecimento de um grupo que deveria ser visível como tal. Por exemplo, um ciclista pode não ser visível quando se encontra a uma distância razoável e, no entanto, a sua eliminação pode provocar o desaparecimento indesejado do pelotão onde ele se integra.

Estes problemas surgem, em parte, pelo facto de a percepção do comportamento por parte do observador humano não variar com a distância de observação da mesma forma que a percepção visual do aspecto.

O problema da falta de coerência torna-se mais notado sobretudo se o tempo em que um objecto se encontra invisível for suficientemente curto para que o erro de simulação seja evidente. Esta dependência do tempo de invisibilidade é uma das características da eliminação de objectos do processo de simulação, que não se verifica na aplicação da mesma técnica ao processo de síntese de imagem. Pode ser exemplificada supondo a aplicação de uma estratégia de selecção de objectos partilhada como a representada na figura 44, ao modelo do pêndulo esquematizado na figura 29.

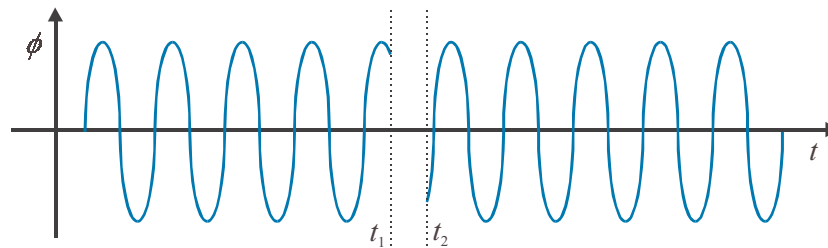


Figura 46. Efeito de uma ausência de simulação curta num pêndulo ideal

A figura 46 apresenta a variação observável do ângulo de alongamento do pêndulo (ϕ), supondo que, durante o período de t_1 a t_2 o pêndulo se encontrava numa posição de invisibilidade e portanto também de não simulação. No instante t_2 , o pêndulo regressou a uma zona de simulação, pelo que tem de ser determinada uma nova posição para o pêndulo sem o conhecimento do seu estado anterior. Na situação representada na figura 46, esta escolha pode ser considerada como crítica, já que, devido ao facto do período de invisibilidade ter sido curto, o observador mantém expectativas muito precisas sobre o estado em que o pêndulo se deve encontrar no instante t_2 . A atribuição ao pêndulo de um

ângulo de alongamento (ϕ) diferente do esperado pelo observador, pode provocar sensações desagradáveis de incorrecção da simulação.

Já no caso representado na figura 47, esta mesma escolha pode ser considerada pouco importante, visto que, devido ao longo período de invisibilidade a que o pêndulo esteve sujeito, o observador aceitará como correcto qualquer ângulo de alongamento (ϕ) atribuído ao pêndulo. Pode-se portanto concluir que os problemas de falta de coerência introduzidos pela utilização de técnicas de eliminação de objectos no processo de simulação, são dependentes dos períodos de invisibilidade, sendo mais significativos para períodos curtos.

Por outro lado, é fácil provar que estes problemas dependem também do tipo de simulação utilizado. A escolha do ângulo de alongamento efectuada no instante t_2 é facilmente implementável de forma exacta se o modelo utilizado for do tipo geométrico apresentado na secção 3.2.1 ou do tipo cinemático apresentado na secção 3.2.2. Já para modelos de nível superior, a escolha torna-se mais complexa, devido à falta de conhecimento sobre o estado anterior.

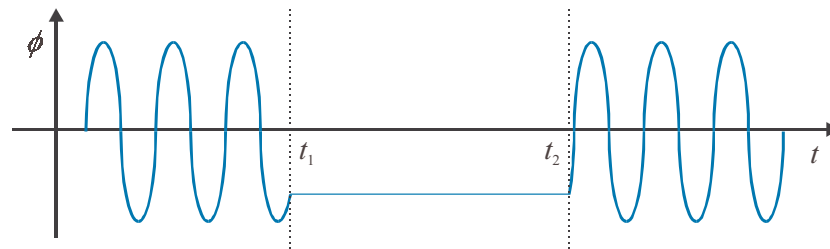


Figura 47. Efeito de uma ausência de simulação longa num pêndulo ideal

Os problemas devidos à eliminação da simulação de objectos dependem também dos períodos de simulação considerados pelo modelo. Como foi referido para a situação representada na figura 47, a ausência de simulação durante um intervalo de tempo razoável não provoca problemas à coerência do ângulo de alongamento. No entanto, uma ausência de simulação durante o mesmo intervalo de tempo pode provocar incoerências facilmente observáveis na simulação de período mais longo, como é o caso do pêndulo amortecido representado na figura 48.

Isto leva a considerar que os efeitos da eliminação da simulação serão mais dramáticos quando aplicados aos níveis superiores (estratégico e tático) de um modelo de condutor automatizado de veículos, uma vez que estes níveis tratam de considerações referentes a períodos mais longos.

Em [Carlson97] é apresentada uma estratégia de variação do nível de detalhe com que o modelo dinâmico dos elementos animados é resolvido, mas não são considerados os problemas que possam surgir pela utilização dos modelos dinâmicos aproximados sugeridos. Esses problemas são a principal preocupação de outros trabalhos da simulação de modelos dinâmicos, embora com abordagens mais aproximadas de uma simples selecção dos objectos a simular pela inclusão no volume de visibilidade [Chenney97]. Nenhuma

destas abordagens é aplicada a modelos comportamentais capazes de tomarem opções cujo efeito pode ser sentido apenas a longo prazo, como a que será apresentada no capítulo 5.

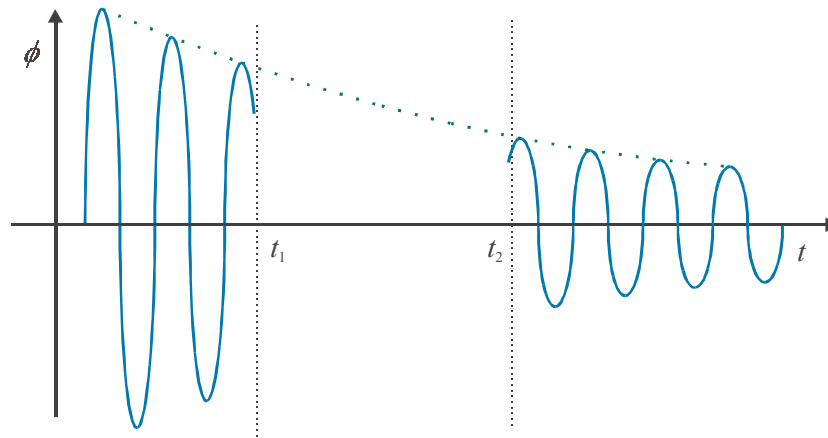


Figura 48. Efeito de uma ausência de simulação longa num pêndulo amortecido

Uma abordagem mais semelhante à técnica desenvolvida e apresentada no capítulo 5 é proposta em [Fernandez99]. Nessa abordagem, também orientada para a simulação de veículos autónomos num simulador de condução, propõe-se a substituição da simulação dos veículos autónomos distantes por uma simulação de grupos de veículos, utilizando modelos macroscópicos de tráfego. Estes modelos, que são estudados e utilizados em diversas aplicações de engenharia de tráfego, mantêm representações de fluxos rodoviários utilizando parâmetros como a densidade de veículos e a velocidade média [Haefner98]. Abordagens semelhantes podem ser equacionadas para outros elementos autónomos, utilizando modelos de grupo como os que podem ser encontrados em [Borgan97] e [Reynolds87], aplicados a bandos ou rebanhos de animais.

Estas abordagens sugerem portanto aplicações da selecção do nível de detalhe a um nível mais elevado do que a técnica que será proposta na secção 5.2. Por outras palavras, as abordagens que propõem a utilização de modelos de grupo diferem da apresentada na secção 5.2, uma vez que consistem na variação do nível de detalhe dos objectos aos quais é aplicada a simulação comportamental. A técnica que se propõe na secção 5.2 baseia-se na variação do nível de detalhe comportamental aplicado a cada objecto autónomo.

Por si só, as abordagens que propõem a utilização de modelos de tráfego não permitem eliminar as deficiências apontadas anteriormente à técnica vulgar da eliminação dos agentes distantes. Apenas reduzem significativamente a perda de coerência estratégica. A sua implementação obriga à utilização de mais modelos de simulação completamente diferentes dos utilizados para veículos e somente fornecem algumas pistas que facilitam o controlo do nascimento de novos agentes, que representa uma das maiores dificuldades da implementação da técnica da eliminação dos agentes distantes. Aliás, a utilização de algoritmos de tráfego para simular os fluxos rodoviários nas artérias distantes pode ser vista como uma metodologia para selecção dos instantes e dos lugares onde os novos agentes serão gerados.

3.8 Controlo dos agentes autónomos

Nas últimas secções foram abordadas as metodologias utilizadas para a implementação de agentes autónomos, tanto em simuladores de condução como em outros ambientes virtuais. No entanto, conforme foi já referido na secção 3.6.3.2 para o caso dos simuladores de condução, a autonomia completa não é suficiente, pelo menos de forma generalizada a todos os elementos que povoam o cenário de simulação. Para permitir a implementação exacta das situações de tráfego a estudar, deve ser possível controlar pelo menos alguns dos elementos autónomos que povoam a cena. Idealmente, este controlo deve ser possível de forma reactiva e com comandos de diversos níveis. A necessidade de prever metodologias de controlo para outros tipos de agentes autónomos presentes num ambiente virtual foi já apontada em [Blumberg95]. Nesta secção referem-se alguns requisitos e algumas das experiências conhecidas de controlo de agentes autónomos.

Os modelos comportamentais têm como objectivo accionar os actuadores que controlam os graus de liberdade dos objectos respectivos. No caso de um veículo, estes actuadores são tipicamente o volante e os pedais. Da mesma forma, o controlo de um agente autónomo com comportamento próprio realiza-se pelos actuadores que gerem os graus de liberdade do comportamento do agente.

Embora a distinção entre o controlo dos agentes autónomos e a sua especificação possa não ser nítida, podemos definir o controlo de agentes autónomos como sendo a acção que leva o agente autónomo a adquirir um comportamento específico, sem modificação das suas características internas. Um exemplo concreto de uma situação de controlo deste tipo é o que acontece nos cruzamentos controlados por sinalização luminosa. Neste caso, os agentes autónomos, que são os condutores dos veículos, são naturalmente levados a parar sempre que a luz vermelha se encontra visível. Pelo controlo externo do semáforo, é então possível impor (ou sugerir) uma acção de paragem a um veículo autónomo, sem modificar as características comportamentais do seu condutor.

Na generalidade dos simuladores de condução desenvolvidos com objectivos científicos, utilizam-se modelos comportamentais distintos para a simulação dos elementos autónomos e dos elementos controlados, conforme se representa na figura 49. Há até casos de utilização de três modelos distintos, com vista à implementação do tráfego ambiente, dos veículos controlados e dos veículos que reagem a eventos.

Numa cena genérica destinada a uma experiência de simulação de condução, existe normalmente um grande número de veículos autónomos e apenas alguns veículos controlados colocados em posições chave. Os veículos autónomos reagem ao tráfego envolvente de acordo com a sua parametrização inicial, não sendo portanto possível prever a sua posição no final da experiência. Por outro lado, os veículos controlados cumprem rigidamente o percurso que lhes foi estabelecido, normalmente sem nenhuma capacidade de reagir aos acontecimentos no ambiente envolvente. Para o preparador da experiência fica a responsabilidade de seleccionar os veículos a controlar, de forma a que estes implementem o acontecimento de tráfego pretendido e não provoquem situações anómalas.

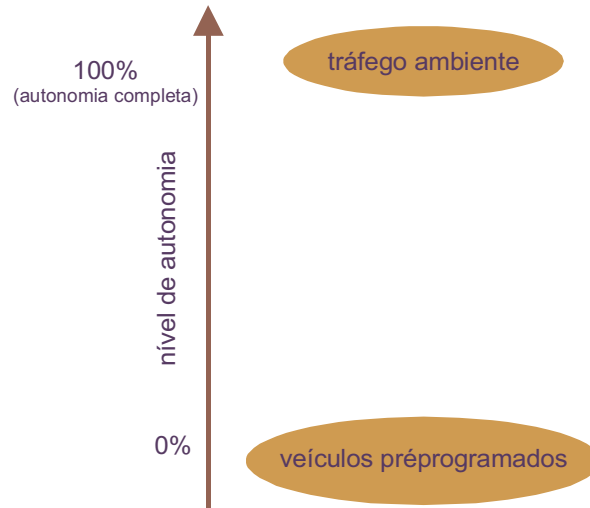


Figura 49. Abordagem por múltiplos modelos

Para controlo dos veículos pré-programados nos simuladores de condução, foram desenvolvidas várias linguagens, cada uma com as suas próprias gramática e sintaxe [Kearney99]. Estas linguagens, semelhantes às linguagens de programação de computadores, utilizam ordens precisas que os veículos cumprem obrigatoriamente, mesmo que isso provoque efeitos colaterais pouco naturais. Normalmente, a especificação de acções complexas utiliza sequências (pré-concebidas ou não) de acções rígidas mais elementares.

Existem, no entanto, desenvolvimentos que tentam utilizar a autonomia própria dos veículos para resolver o cumprimento de comandos de nível superior impostos exteriormente. Em [Papelis96] apresenta-se uma linguagem gráfica que permite controlar veículos autónomos num simulador de condução utilizando comandos de baixo nível e comandos de nível superior designados por Coordenadores de Alto Nível. Estes coordenadores são implementados pontualmente no interior do modelo comportamental e accionados pelo controlador exterior através de entradas específicas. Desencadeiam acções de alto nível obrigatórias, podendo no entanto atrasar ou limitar a acção por razões de segurança. Por exemplo, a ordem de alto nível de ultrapassar o veículo da frente não é executada de forma cega, mas é condicionada ao facto da via da esquerda se encontrar livre. No entanto, a ultrapassagem será consumada mesmo que para isso seja perdida a saída da auto-estrada pretendida ou que outros objectivos fiquem por cumprir.

As técnicas de controlo de agentes autónomos mais impressionantes, quer pela eficiência obtida, quer pela simplicidade de concepção, são algumas das utilizadas desde há longos séculos pelos humanos para controlarem alguns seres vivos animais. Estas técnicas podem ser divididas em dois grupos: a técnica da cenoura e a técnica do chicote.

3.8.1 Técnica da cenoura

A clássica técnica da cenoura consiste na apresentação de benefícios, induzindo a esperança de que estes benefícios possam ser alcançados se um determinado objectivo for alcançado. O seu exemplo mais conhecido consiste na utilização de uma cenoura (benefício) colocada na frente de um animal de carga para o motivar a caminhar.

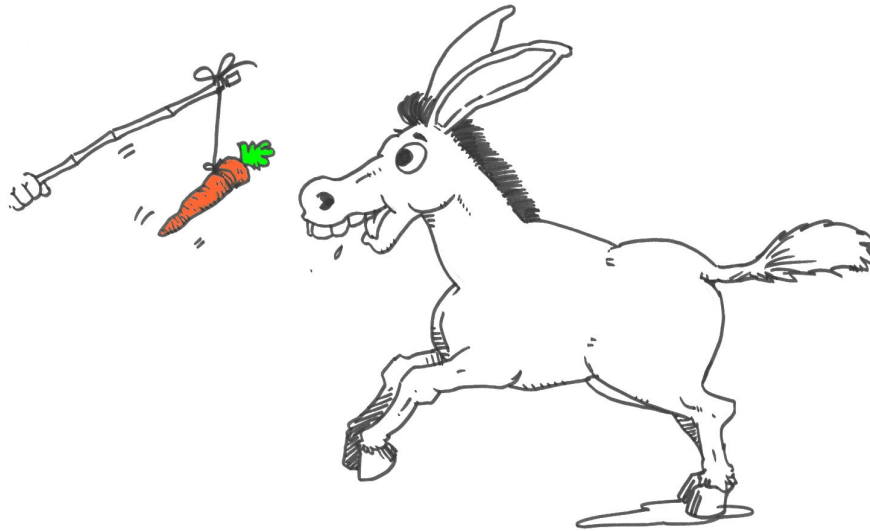


Figura 50. O exemplo clássico da técnica da cenoura

Deve-se notar que a aplicação desta técnica não implica directamente a especificação de um comportamento. A imagem do benefício apenas sugere a adopção de uma determinada direcção. Eventualmente, pode ser considerado que a força da sugestão depende da dimensão do benefício apresentado. No entanto, o agente a quem é apresentado o benefício mantém as restantes faculdades para decidir optar ou não pela direcção do benefício apresentado, em função das dimensões deste, dos objectivos que persegue e da análise de todo o ambiente envolvente.

3.8.2 Técnica do chicote

O chicote é um objecto tradicionalmente ligado à imposição. A sua utilização consiste na ameaça de aplicação de um castigo se determinado comportamento (como ficar parado) for seguido. Tal como no caso anterior, a aplicação desta técnica não impede directamente a adopção de um comportamento, apenas lhe adiciona uma desvantagem.

A figura seguinte apresenta um exemplo clássico de utilização de um chicote para o controlo de um agente autónomo.

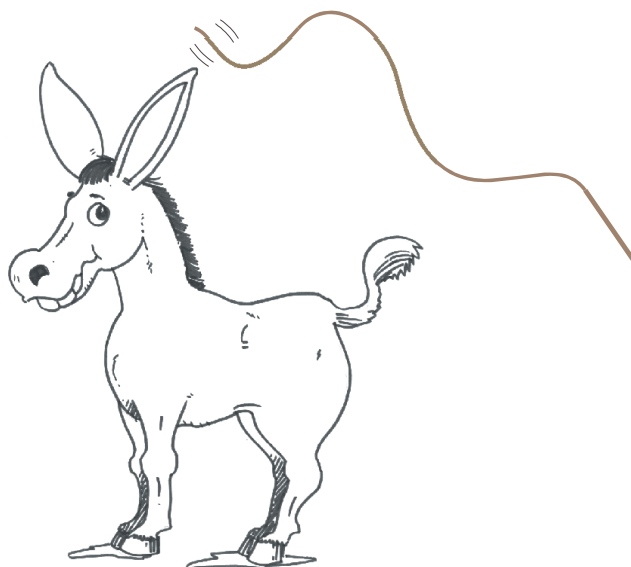


Figura 51. O exemplo clássico da técnica do chicote

A simplicidade desta técnica e da anterior reside no facto de, ao contrário da técnica proposta em [Papelis96], a sua implementação não necessitar de nenhuma modificação interna no agente autónomo. Apenas são utilizadas as entradas (sentidos) já disponíveis.

3.9 Sumário

Neste capítulo abordaram-se diversas áreas que contribuem para a implementação de condutores competentes e realistas de veículos virtuais autónomos destinados ao povoamento dos ambientes rodoviários utilizados num simulador de condução. Depois de uma breve abordagem à forma como os condutores humanos resolvem a tarefa de condução dos veículos automóveis reais, descreveram-se as tecnologias utilizadas na implementação de controladores artificiais de veículos automóveis reais e as metodologias disponíveis para a implementação de agentes realistas em ambientes virtuais.

Algumas destas técnicas são utilizadas na implementação do tráfego autónomo no simulador de condução DriS, que será apresentado no capítulo 5. O nível de modelação seleccionado (modelação comportamental) apresenta grandes vantagens sobre a modelação de níveis mais baixos, sobretudo em termos de realismo e de facilidade de especificação de ambientes. Estas vantagens são obtidas por meio de um aumento do custo computacional e também de um aumento das dificuldades associadas à capacidade de controlo externo. Nas aplicações que exigem um controlo preciso de alguns dos elementos autónomos, como é o caso dos simuladores de condução, a dificuldade de controlo dos modelos comportamentais é normalmente contornada pela introdução de novos agentes, simulados através de modelos não comportamentais. As soluções deste tipo obrigam, portanto, ao desenvolvimento de, pelo menos, dois modelos distintos.

O elevado peso computacional associado à simulação de um grande número de elementos autónomos exige a utilização de técnicas de optimização deste processo. A técnica de optimização mais utilizada consiste em efectuar a simulação apenas dos objectos que se encontram mais próximos do observador e algumas abordagens desta técnica foram apresentadas na secção 3.7. Nesta secção foram também analisadas as implicações da aplicação desta técnica sobre o realismo da simulação e as suas consequências nos diversos níveis de simulação. Conforme se demonstrou, a aplicação de técnicas de eliminação de simulação provoca incoerências na simulação, sobretudo a longo prazo, dificulta o processo de especificação de ambientes, obriga a desenvolvimentos adicionais destinados à geração de novos agentes, e a redução do peso computacional obtida é, por vezes, insuficiente.

Como também foi demonstrado, todos estes problemas se tornam mais significativos quando se utiliza simulação de nível elevado, como é o caso da simulação comportamental. Estas dificuldades serviram de motivação ao desenvolvimento de uma técnica inovadora de optimização do processo de simulação de um grande número de agentes que será apresentada na secção 5.2.

Capítulo 4

O Simulador de Condução DriS

Neste capítulo apresenta-se a concepção e a implementação do simulador de condução DriS. Este simulador tem vindo a ser desenvolvido desde 1994, com objectivos de investigação nas áreas do comportamento de condução e da segurança rodoviária.

No seu estado actual de desenvolvimento, o simulador de condução DriS constitui já um sistema funcional que é capaz de servir de suporte à realização de estudos experimentais semelhantes aos permitidos pelos simuladores de condução científicos mais avançados em termos europeus. O processo de desenvolvimento deste simulador pode ser considerado como exemplar em termos da relação entre as funcionalidades oferecidas pelo simulador e os meios empregues no seu desenvolvimento. Para isso foi seleccionada uma arquitectura modular e descentralizada, com a utilização preferencial de componentes de baixo custo. Todos os componentes foram desenvolvidos por uma equipa multidisciplinar de poucos elementos em ligação permanente.

Na secção 4.1, apresentam-se os objectivos que motivaram o desenvolvimento deste simulador de condução, e na secção 4.2 faz-se referência às aplicações mais significativas já realizadas com esta infra-estrutura. A arquitectura geral do simulador de condução DriS e a implementação de cada um dos seus componentes principais são apresentadas nas restantes secções deste capítulo.

Para permitir a simulação do tráfego envolvente, foi desenvolvido um condutor virtual que dirige os veículos autónomos presentes no ambiente rodoviário. Estes veículos autónomos e os respectivos condutores, baseados em modelos comportamentais, serão descritos, em separado, no capítulo 5. A opção por modelos deste tipo permite, ao preparador de uma experiência de simulação, povoar ambientes rodoviários extensos, de forma simples e realista.

4.1 Objectivos

Com o desenvolvimento deste simulador pretende-se obter uma infra-estrutura operacional que permita a realização de trabalhos experimentais de investigação nas áreas do comportamento de condução e da segurança rodoviária. Para isso, tem sido atribuída crucial importância à facilidade oferecida na criação de situações realistas de tráfego, com um elevado grau de controlo de um grande número de variáveis, permitindo assim:

- Analisar o comportamento de condutores em situações de difícil ou impossível reprodução em situações reais (por exemplo, simulação de situações de risco e mesmo de acidente).
- Analisar o comportamento de condutores perante novas estradas, sistemas de gestão e de sinalização e modelos de veículos, antes mesmo da sua construção ou implementação.

O estudo da eficácia de medidas que visem propiciar condições de segurança rodoviária pode ser realizado através da comparação adequada de índices de sinistralidade, determinados antes e depois da implementação efectiva dessas medidas, pelo que se torna necessário introduzir alterações antes de verificar se são as adequadas, comportando, eventualmente, alguns riscos e custos acrescidos. Por este motivo haverá, em princípio, vantagem em dispor de um modelo que reproduza com fidelidade as características do mundo real.

A utilização dos simuladores de condução no âmbito da segurança rodoviária abre novas perspectivas ao seu estudo, já que permite ensaiar situações que envolvam perigo potencial, cuja análise seria, de outro modo, impossível de realizar. Por outro lado, ao permitir um elevado controlo de variáveis nos casos a estudar, estes dispositivos tornam esta metodologia especialmente atraente.

Sendo o condutor, a infra-estrutura rodoviária e o veículo, as três componentes elementares do sistema de tráfego, as aplicações do simulador de condução são dirigidas especialmente para o estudo das interacções bilaterais entre a primeira e qualquer uma das duas últimas. O estudo do comportamento do veículo em função da infra-estrutura rodoviária requer um tipo de abordagem diferente.

Assim, e no âmbito da segurança rodoviária, os objectivos específicos deste simulador podem ser agrupados em avaliações do traçado, estudo de distâncias de visibilidade e ensaios de sinalização rodoviária, entre outros [Rodrigues00]. No âmbito da relação do condutor com o veículo, destacam-se os estudos de novos equipamentos de segurança ou de ajuda ao condutor, e novas tecnologias de interacção com o equipamento.

4.1.1 Avaliação do traçado

Face a um determinado projecto de traçado e tendo em atenção, quer o ambiente rodoviário em que a estrada se desenvolverá, quer o volume de tráfego esperado, avalia-se a solução adoptada, detectando possíveis secções críticas em termos de segurança rodoviária. Com recurso a simuladores dinâmicos é possível estudar o comportamento do veículo em curva, quantificando, segundo parâmetros de segurança e comodidade, os elementos geométricos do projecto.

4.1.2 Distâncias de visibilidade

A visibilidade é fundamental para a segurança na condução. Ao longo do traçado, deverá ser assegurada: distância de visibilidade para que os condutores possam, se necessário, parar o veículo (distância de visibilidade de paragem); distância de visibilidade que permita aos condutores, face à informação sinalética ou a alterações nas características geométricas da estrada, tomar as decisões correctas (distância de visibilidade de decisão); distância de visibilidade necessária para que as manobras de ultrapassagem se possam processar em segurança e comodidade (distância de visibilidade de ultrapassagem). Com o auxílio de um simulador é possível estudar, em diferentes ambientes rodoviários, as principais variáveis que estão presentes na quantificação das distâncias de visibilidade referidas, nomeadamente os tempos de reacção, os tempos de travagem e o tipo e a adequação de manobras evasivas em situações de risco. Desta forma é possível sugerir valores a adoptar nas normas construtivas que tenham em conta a realidade nacional e regional respeitante ao comportamento de condução.

4.1.3 Sinalização rodoviária

A sinalização rodoviária, vertical e horizontal, tem em vista regular a circulação, indicando aos utentes da estrada a forma correcta e segura como esta deve ser utilizada. Para atingir este objectivo poderão ser desenvolvidos estudos integrados sobre a localização, as dimensões, as cores e os tipos de materiais a utilizar nos sinais.

O recurso ao simulador permite ainda avaliar os projectos de sinalização, averiguando se os dispositivos adoptados são eficazes, isto é, se a mensagem é percebida pelos condutores e se estes dispõem de tempo/espço necessário para a execução das manobras adequadas.

4.1.4 Ensaio de equipamento

A introdução de novos sistemas de segurança activa, como dispositivos de travagem, sistemas de aviso ao condutor ou sistemas de orientação, nem sempre produz os resultados esperados. Como se demonstrou pela experiência dos táxis de Munique, referida na secção 3.1.1.2, os condutores reagem à presença de novos dispositivos alterando o seu comportamento, pelo que o efeito da utilização de um novo dispositivo deste tipo deve ser previamente avaliado. Por outro lado, novos equipamentos destinados ao aumento do conforto dos ocupantes do veículo, como por exemplo telefones, aparelhagens sonoras ou

televisões podem afectar o desempenho do condutor de forma desconhecida, não uniforme para todos os condutores.

A utilização de um simulador de condução permite um ensaio destes equipamentos de forma segura e em condições controladas, por um grande número de condutores.

4.2 Aplicações

O simulador de condução DriS foi já utilizado em diversos estudos experimentais de comportamento de condutores humanos e alguns outros estudos estão neste momento em fase de preparação. Nesta secção apresenta-se uma pequena descrição dos estudos experimentais já realizados e dos mais significativos que se encontram em fase avançada de preparação. São também referidos apontadores para outras publicações que oferecem uma descrição mais pormenorizada dos mesmos estudos.

4.2.1 Detecção de movimentos relativos de veículos

No estado actual de desenvolvimento do simulador, foi realizado um estudo de detecção de movimento (aproximação ou afastamento de um veículo que antecede o veículo de teste) em três situações: pavimento de cimento, pavimento betuminoso e pavimento betuminoso com bandas cromáticas.

Participaram neste estudo 106 pessoas legalmente habilitadas para a condução de veículos ligeiros na via pública. Destas, 49 eram do sexo feminino e 57 do sexo masculino. As idades variavam entre os 20 e os 57 anos de idade, sendo a média de 35 anos e o desvio padrão de 11.5.



Figura 52. Pavimento de asfalto

Utilizando o simulador de condução em modo não interactivo, foram simuladas situações de viagem em via pública onde os condutores, que se deslocavam a 50 Km/h, tinham que detectar o movimento relativo de outro veículo. Este veículo foi colocado a uma distância

inicial de 20 metros e movimentado com 5 velocidades relativas diferentes. Foram também usados os três tipos de pavimentos referidos anteriormente (figuras 52 a 54). Foram utilizados dados realistas para a especificação do perfil da via e o veículo perseguido foi simulado utilizando uma imagem processada de um VW Polo, modelo de 1992.

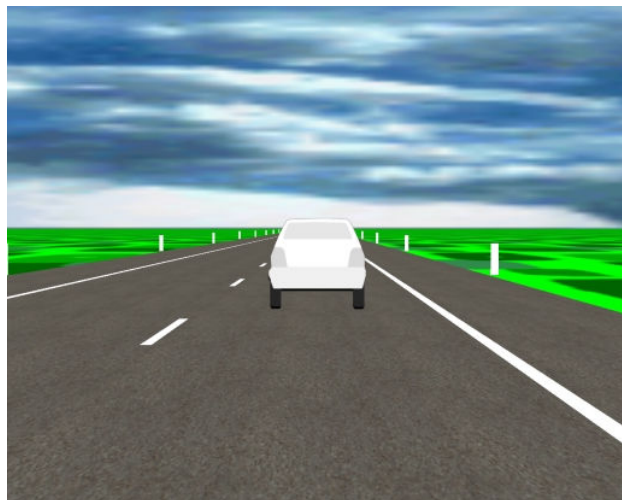


Figura 53. Pavimento de cimento

Analisando os resultados, verificou-se que a situação que conduziu a um maior número de detecções erradas foi a correspondente ao pavimento betuminoso com bandas cromáticas, devido ao valor elevado do fluxo óptico (aproximadamente o quádruplo do movimento visual). O contraste de luminância entre o veículo e a estrada não se revelou um factor determinante na detecção de movimento.

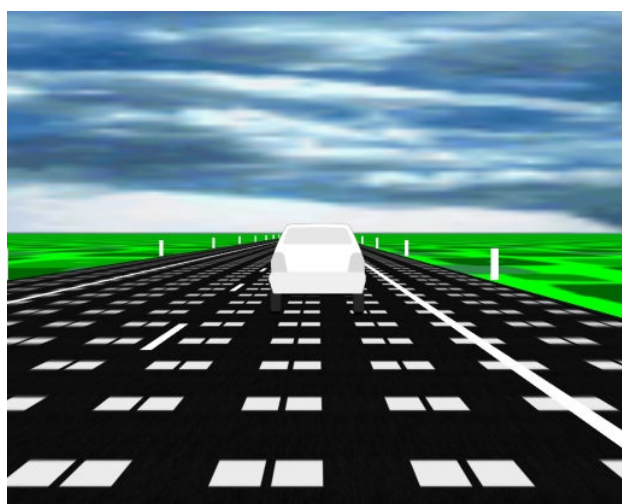


Figura 54. Pavimento com bandas cromáticas

Com esta experiência pôde-se concluir que a adopção das bandas cromáticas conduz a uma maior dificuldade de detecção do movimento, sem pôr, no entanto, em dúvida a sua eficácia

como dispositivo de alerta aos condutores em pontos particulares da estrada, nomeadamente nas passadeiras de peões. Mais informação sobre este estudo pode ser encontrada em [Noriega97].

4.2.2 Influência de painéis publicitários exteriores

Encontra-se em fase final de preparação um conjunto de experiências destinadas ao estudo da deterioração do desempenho dos condutores provocado por painéis publicitários exteriores (*outdoors*). Serão registadas as alterações na atenção, medidas através da análise de movimentos oculares, provocadas por diferentes tipos e colocações de painéis publicitários.

Neste estudo será variada a complexidade da tarefa principal (condução) e da tarefa secundária (observação dos painéis) de forma a permitir determinar de que maneira os painéis publicitários interferem com a tarefa da condução. Espera-se poder concluir se a tarefa de observação dos painéis concorre com a tarefa principal prejudicando-a, ou se, pelo contrário, o condutor realiza a tarefa de observação dos painéis publicitários apenas quando existem recursos disponíveis do cumprimento da tarefa principal.

Depois de efectuar um percurso de adaptação ao simulador, cada sujeito terá de realizar uma sequência de 6 percursos. Nos primeiros 3 percursos, é simplificada a tarefa de condução pela limitação do número de veículos e pela utilização de caixa de velocidades automática. No primeiro percurso não existem painéis publicitários. No segundo percurso existe um conjunto de painéis publicitários de baixa complexidade e fraca atractividade. No terceiro percurso são apresentados painéis publicitários com um maior nível de complexidade e atractividade. Os três últimos percursos são idênticos aos três primeiros, mas são realizados em situações de condução mais complexas, com caixa de velocidades manual e maior densidade de tráfego ambiente.



Figura 55. Vista do ambiente virtual criado para o estudo experimental da influência de painéis publicitários exteriores

Para a realização deste estudo foi criado um ambiente virtual que reproduz o aspecto das ruas típicas da cidade do Porto. Os edifícios foram modelados utilizando imagens fotográficas reais. O tráfego foi implementado através da utilização de veículos com percurso predefinido e veículos autónomos baseados no modelo comportamental descrito no capítulo 5. As figuras 55 e 56 apresentam duas vistas deste modelo e, nesta última, pode ainda ser observado, ao fundo, um conjunto de painéis publicitários exteriores.



Figura 56. Vista do mesmo ambiente virtual, observando-se, ao fundo, um conjunto de painéis publicitários exteriores

4.2.3 Avaliação de métodos de ensino da condução

Este estudo, também em fase de preparação, será realizado com dados obtidos a partir de indivíduos não habilitados legalmente para a condução de veículos automóveis na via pública. Cada um dos indivíduos será submetido a um curso de condução que poderá incluir lições de condução num veículo real e no simulador de condução. O realismo oferecido pelo simulador de condução será ajustado entre o funcionamento não interativo clássico, e o máximo de realismo e de interactividade que é possível obter do simulador de condução DriS. Cada um dos métodos de aprendizagem será avaliado pela comparação do desempenho dos condutores antes e depois de ministrado o curso.

O conjunto de indivíduos encontra-se em formação, utilizando pessoas que satisfazem simultaneamente os seguintes requisitos:

- Não possuem carta de condução
- Desejam obter a carta de condução
- Não possuem deficiências físicas ou visuais
- Têm, de preferência, entre 16 e 22 anos de idade.

Para a realização deste estudo serão realizadas duas experiências idênticas. A primeira experiência (experiência preliminar) permitirá seleccionar os currículos dos cursos utilizados na segunda experiência (experiência final).

Cada sujeito será avaliado em termos de desempenho de condução e atribuído, de forma aleatória, a um de 4 grupos, que deverão ser aproximados em número de sujeitos e respectivas capacidades intelectuais. Está prevista a utilização de cerca de 20 sujeitos na experiência preliminar e de cerca de 200 na experiência final. A cada grupo de sujeitos, em ambas as experiências, será ministrado um curso de condução diferente, conforme se esquematiza na figura 57.

O curso 1 será um curso de condução com o formato tradicional, como os que se podem frequentar em diversas escolas de condução. Em Portugal, o currículo mínimo de um curso de condução inclui 25 horas de lições práticas, mas é reconhecido que este mínimo não é por vezes necessário para se obter a competência de condução requerida. Neste estudo, a avaliação final terá lugar depois de 15 horas de lições práticas.

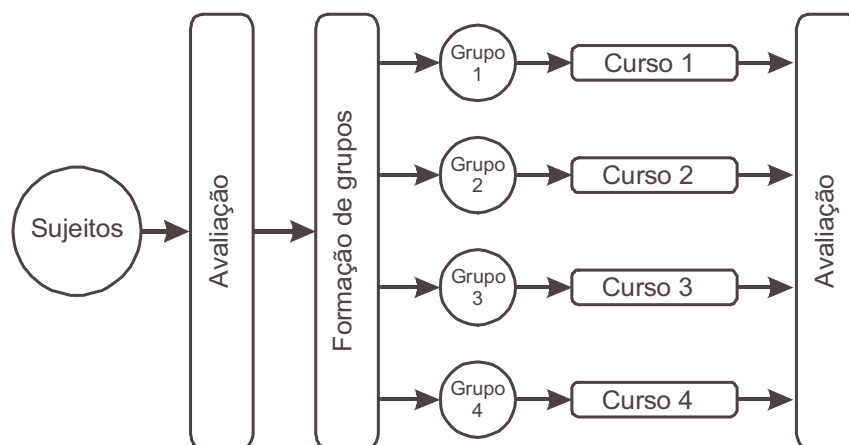


Figura 57. Esquema de realização das experiências.

Os outros cursos serão constituídos por aulas práticas de condução em ambiente real, intercaladas com lições de condução utilizando o simulador de condução. As aulas em ambiente simulado serão supervisionadas por um instrutor e incluirão prática simulada de condução sob diversas condições de intensidade do tráfego, velocidade média do tráfego e características do veículo próprio.

Nos cursos 2, 3 e 4 serão utilizadas configurações distintas do simulador e o número de horas de lições de condução em ambiente simulado será também variado. A tabela 3 apresenta a constituição sugerida para cada um dos cursos da experiência preliminar.

Tabela 3. Constituição dos cursos a utilizar na experiência preliminar

Curso	Hora práticas	Horas em ambiente simulado	Configuração do simulador
1	15	0	-
2	5	15	Realismo máximo
3	5	20	Limitação do campo visual
4	5	25	Sem interactividade

A experiência final deste estudo utilizará a mesma metodologia, mas com diferenças ao nível do número de sujeitos, do número de grupos e de cursos, assim como no currículo dos cursos de condução que serão ministrados. Os currículos a utilizar nesta experiência final serão determinados em função dos resultados obtidos na primeira experiência.

4.2.3.1 Avaliações

O desempenho de cada um dos sujeitos será avaliado antes e depois da frequência do curso. Esta avaliação será efectuada com base em dados recolhidos durante a condução no simulador, configurado na sua forma mais realista.

Para o efeito, cada sujeito efectuará uma prova de condução no simulador, que será constituída por um percurso preliminar seguido do percurso experimental. O percurso preliminar destina-se unicamente a permitir a adaptação do sujeito ao simulador e o percurso experimental será constituído por três fases: uma fase de condução isolada, uma fase de condução num ambiente com uma pequena intensidade de tráfego e uma terceira fase num ambiente com uma grande intensidade de tráfego.

Durante todo o trajecto experimental, vários parâmetros de condução serão medidos e armazenados para análise posterior. Estes parâmetros, que serão monitorizados, podem ser divididos em três grupos:

- Taxa de esforço mental (RSME)
- Movimentos oculares, obtidos por um gravador de direcção de olhar (NAC)
- Avaliações de desempenho

As avaliações de desempenho serão utilizadas para a determinação da taxa de aprendizagem de cada sujeito. Presume-se que as avaliações de desempenho realizadas antes da aplicação dos cursos serão diferentes das avaliações finais. As taxas de aprendizagem serão determinadas pela diferença entre alguns parâmetros obtidos na avaliação de desempenho, nomeadamente:

- O número de erros cometidos
- Os tempos de reacção
- Os tempos para intersecção com os limites da estrada

- O controlo do percurso
- A velocidade de condução
- O número de colisões

Estas medidas, que serão obtidas pelo processamento dos relatórios produzidos em tempo real pelo simulador, serão depois utilizadas na classificação da qualidade da condução de cada sujeito. Para isso será utilizado um método de análise baseado na decomposição da tarefa de condução em sub-tarefas e na atribuição de pesos diferenciados para cada parâmetro e cada sub-tarefa, à semelhança da metodologia formulada em [McGinnis96].

O desempenho dos sujeitos ao longo desta segunda experiência será também analisado por especialistas e instrutores de condução, de forma a validar e completar o processo de avaliação realizado. Esta análise será baseada nas sequências de imagem gravadas durante a condução, a partir do posto de condução, e nas classificações obtidas pelos condutores na resolução de problemas teóricos típicos das escolas de condução. Os resultados objectivos (quantitativos) obtidos da avaliação da condução durante a realização da experiência, serão depois comparados com a análise subjectiva realizada pelos especialistas. Esta comparação permitirá aferir a validade dos relatórios subjectivos formulados pelos especialistas em tópicos como o controlo do veículo, qualidades dos condutores face a acontecimentos imprevistos e validar a metodologia de avaliação da aprendizagem ao longo das várias sessões de condução.

Como resultado destes estudos, espera-se determinar de que maneira o realismo da simulação de condução afecta o processo de aprendizagem e sugerir metodologias sobre quando e como um simulador de condução deve ser utilizado de forma a maximizar a produtividade do processo de aprendizagem. Mais pormenores sobre este estudo experimental podem ser encontrados em [Leitão99c].

4.2.4 Outras aplicações

Num futuro próximo será iniciada a preparação de um conjunto de experiências destinadas ao estudo da detecção de velocidade de veículos em função de vários tipos de ambientes rodoviários e tipos de automóveis (tempos de reacção, tempos de travagem, tipo e adequação de manobras evasivas em situações de risco).

Em preparação estão também experiências sobre comportamento de condutores em situações de risco de colisão frontal, nomeadamente em ultrapassagens.

4.3 Arquitectura geral

O simulador de condução DriS integra um posto de condução simplificado de um veículo automóvel com uma estação gráfica SGI *Onyx RealityEngine2* (figura 58) [Leitão97]. Esta estação gráfica mantém a base de dados de objectos da cena e efectua as tarefas de simulação física e de síntese de imagem. Comunica ainda com 2 micro computadores,

sendo um deles destinado à síntese de som [Coelho96] e o outro à monitorização e controlo do posto de condução.

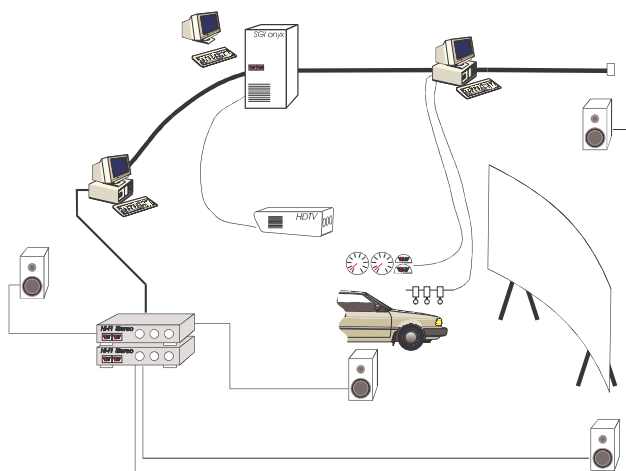


Figura 58. Arquitectura do Simulador de Condução DriS

A integração do sistema realiza-se com base num *toolkit* de simulação de ambientes virtuais genéricos (Genes) desenvolvido localmente para o efeito. O conjunto assenta na plataforma *Performer*, um conhecido software de simulação da Silicon Graphics, como se mostra na figura 59.

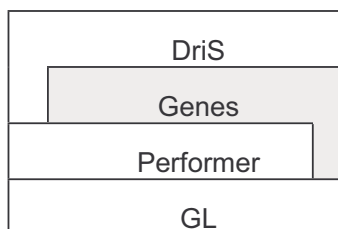


Figura 59. Estrutura do software do Simulador de Condução DriS

A figura 60 apresenta um diagrama com os blocos funcionais principais do simulador de condução DriS. No centro encontra-se a representação do mundo simulado que inclui as definições visuais de todos os objectos existentes no mundo virtual, a representação lógica da rede viária e as representações dos comportamentos físicos dos veículos autónomos e do veículo conduzido interactivamente. As metodologias previstas para a especificação do mundo simulado e as técnicas utilizadas para a sua representação no simulador serão descritas nas secções 4.4 e 4.5.

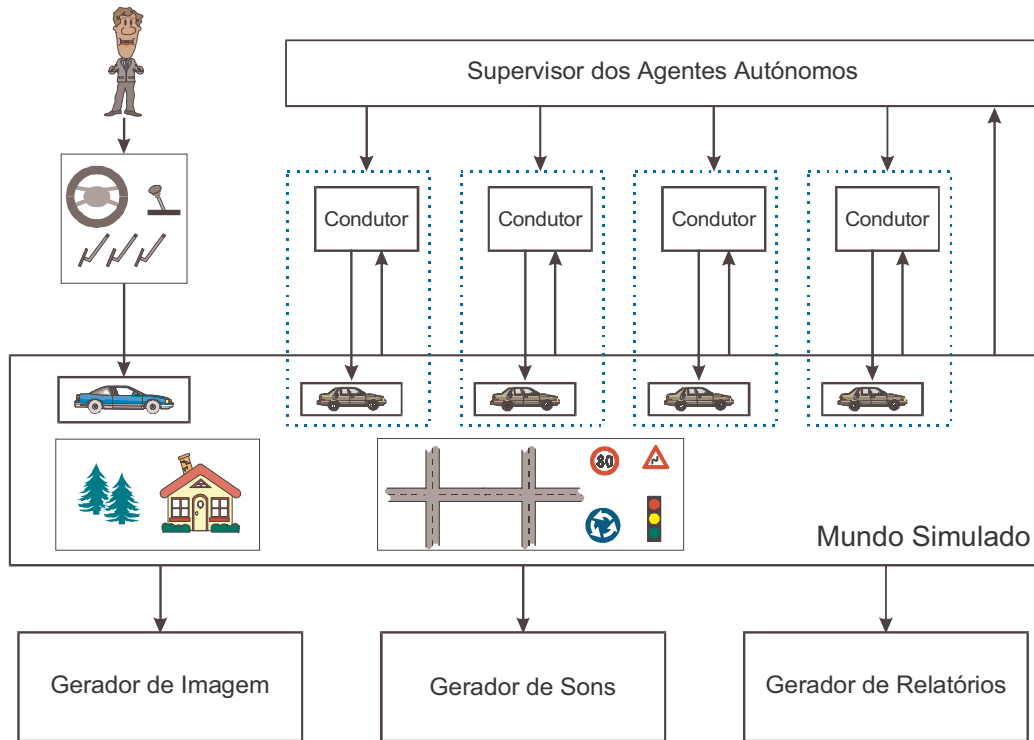


Figura 60. Arquitectura geral do simulador de condução DriS

Os processos de geração de imagem, geração de som e produção de relatórios monitorizam continuamente o mundo simulado de forma a produzirem as saídas adequadas. Estes processos serão tratados respectivamente nas secções 4.9, 4.10 e 4.11. O posto de condução utilizado pelo condutor humano será o tema da secção 4.6. Cada veículo autónomo pode também ser ligado ao condutor virtual respectivo. Estes veículos autónomos, os condutores virtuais que os dirigem e o módulo Supervisor que os coordena serão apresentados em separado, no capítulo 5.

4.4 Especificação de ambientes

Para a especificação de ambientes usam-se ficheiros de texto designados por WDF (World Description Files). Estes ficheiros utilizam uma linguagem de descrição de ambientes 3D desenvolvida especialmente para o simulador DriS, designada por SWDL (Simulated World Description Language). Esta linguagem corresponde a uma evolução do formato SDF definido em [Coelho93].

A linguagem SWDL permite, de uma forma acessível:

- Criar objectos, definir estradas, especificar movimentos ou comportamentos.
- Agrupar objectos hierarquicamente.
- Atribuir movimentos ou comportamentos a objectos.
- Definir propriedades visuais de objectos

- Definir geometria através da especificação de listas de polígonos ou por referência a ficheiros externos. Estes ficheiros externos podem ser definidos em qualquer dos formatos admitidos pelo *Performer* ou no formato WDF.
- Definir câmaras associadas a objectos para permitir a inspecção visual subjectiva.
- Aplicar transformações geométricas (translações, rotações e escalamentos) aos objectos.

A leitura dos ficheiros WDF é realizada por um módulo independente, desenvolvido de acordo com a política definida pelo *Performer* para a implementação de importadores (loaders) de cenas ou de objectos. A representação geométrica adquirida dos ficheiros WDF é também armazenada em estruturas *Performer*. Esta adopção de metodologias e formatos standard permite uma utilização directa das bases de dados visuais definidas em ficheiros WDF em qualquer aplicação *Performer*, desde que o importador respectivo seja aplicado.

O módulo de importação foi também preparado para aplicar pré-processamentos de macros aos ficheiros WDF, utilizando o pré-processor standard da linguagem C [Stallman00] e o pré-processor M4 [Dunne00]. As macros funcionam assim como um melhoramento poderoso da linguagem SWDL que facilita a criação de cenas complexas.

O mundo simulado é constituído por definições de objectos puramente visuais, objectos animados ou com comportamento, e pela rede viária. Os objectos visuais são definidos normalmente por referência a ficheiros externos de modelos 3D.

4.5 Representação da rede viária

Como foi referido na secção 2.2, para desempenhar correctamente as suas tarefas, um simulador de condução necessita de ter acesso a uma representação do ambiente rodoviário em termos lógicos e geométricos. Esta descrição deve permitir acessos rápidos, que permitam o processamento e a animação em tempo real de todos os elementos dinâmicos. Por outro lado, o sistema de síntese de imagem requer uma base de dados de elementos gráficos, especificamente organizada e optimizada para a visualização em tempo real.

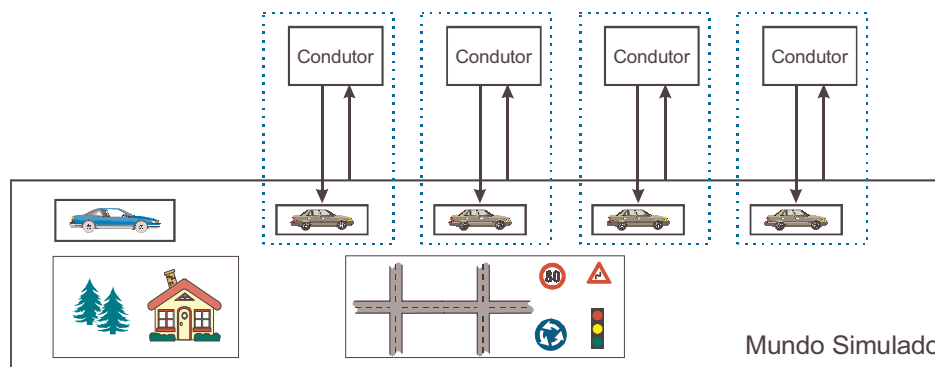


Figura 61. Base de dados de representação do mundo virtual

A rede viária consiste num conjunto de estradas e é representada internamente por estruturas de memória ligadas em grafo. Esta estrutura descreve as posições, as dimensões e

os atributos das intersecções, das estradas, dos sinais de trânsito e dos edifícios no ambiente simulado. Cada estrada é definida a partir de informação do seu perfil e da polilinha que especifica o seu eixo central.

4.5.1 Polilinha

As polilinhas são utilizadas para representar os eixos das vias e podem ser definidas como listas ordenadas de segmentos ligados.

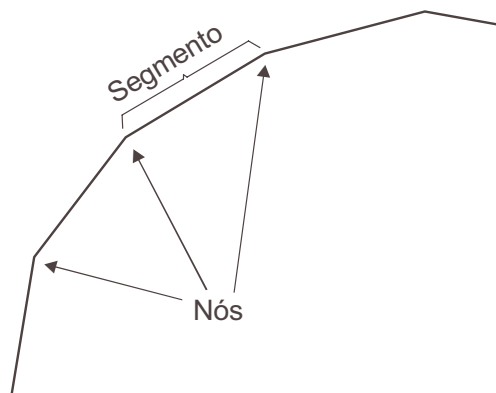


Figura 62. Polilinha

Em termos de concepção, um segmento pode ser recto ou curvo. No entanto, na implementação actual, admitem-se apenas segmentos rectos, existindo portanto a necessidade de decompor as curvas em sequências de vários segmentos de recta. Desta forma, a polilinha pode ser representada apenas pelas coordenadas dos nós de ligação entre os segmentos adjacentes.

Durante o funcionamento do simulador de condução, as representações das polilinhas são exaustivamente consultadas. Alguns dos processamentos típicos mais pesados, sobre as informações das polilinhas, são realizados várias vezes por cada ciclo de simulação, pelo que devem ser optimizados.

A determinação da distância de um ponto qualquer do espaço à polilinha é realizada sempre que é necessário conhecer, por exemplo, a posição de um veículo em relação ao eixo da via. A solução deste problema pode ser obtida por uma pesquisa exaustiva da distância mínima entre o ponto dado e cada um dos segmentos, ou à custa da determinação do ponto da polilinha mais próximo de um ponto qualquer do espaço.

A determinação do ponto da polilinha mais próximo de um ponto qualquer do espaço implica também, normalmente, uma pesquisa exaustiva em todos os segmentos que compõem a polilinha.

A determinação do percurso, sobre a polilinha, entre dois pontos da mesma polilinha, é útil para aferir a que distância longitudinal um veículo se encontra de um cruzamento ou de outro veículo. O algoritmo mais directo para efectuar este cálculo de distância é percorrer todos os segmentos entre os dois pontos dados, acumulando o percurso efectuado em cada

um deles. Este método torna-se pouco eficiente quando os pontos estão afastados por um grande número de segmentos.

A determinação do ponto da polilinha cuja distância, sobre a polilinha, a um ponto dado seja um valor dado, corresponde ao problema inverso do anterior. O algoritmo mais directo para resolver esta determinação baseia-se também no percurso sucessivo dos segmentos até atingir a distância especificada.

Sendo as operações geométricas descritas fundamentais para o bom desempenho do simulador de condução, foi criada uma nova classe de dados para representar as polilinhas utilizadas na especificação do eixo das vias rodoviárias. Esta nova classe (Hiperpolilinha), é derivada da classe Polilinha, como se apresenta na figura 63, incluindo portanto todas as suas funcionalidades. Adicionalmente, a classe Hiperpolilinha mantém uma ordenação hierárquica dos segmentos que compõem a polilinha e implementações optimizadas dos processamentos referidos anteriormente, que permitem uma aceleração acentuada dos cálculos a efectuar.

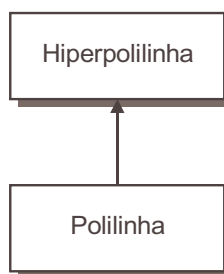


Figura 63. Hierarquia das classes utilizadas para representar polilinhas

A classe Hiperpolilinha mantém a representação dos segmentos sob a forma de lista ordenada, herdada da classe Polilinha. No entanto, cria em paralelo uma nova organização em árvore de segmentos e grupos de segmentos. Os segmentos adjacentes são agrupados e é determinada a caixa envolvente que inclui todos os segmentos agrupados. Estes grupos são depois sucessivamente agrupados em grupos maiores, aos quais são associadas as caixas envolventes respectivas, conforme se apresenta na figura 64.

Uma vez que esta classe de dados foi concebida, essencialmente, para representar eixos de vias rodoviárias, e que estas se alongam, sobretudo, no plano horizontal, na implementação actual, esta organização hierárquica é realizada apenas no plano horizontal.

Os algoritmos de determinação da distância entre um ponto e uma polilinha e de determinação do ponto da polilinha mais próximo de um ponto, utilizam agora pesquisas hierárquicas dos segmentos mais próximos, em vez das pesquisas sequenciais exaustivas referidas anteriormente. Durante uma pesquisa hierárquica, é determinada a distância mínima de uma caixa envolvente de um grupo ao ponto. Se esta distância for superior a outra já obtida para qualquer segmento, então todos os segmentos pertencentes ao grupo testado podem ser imediatamente ignorados.

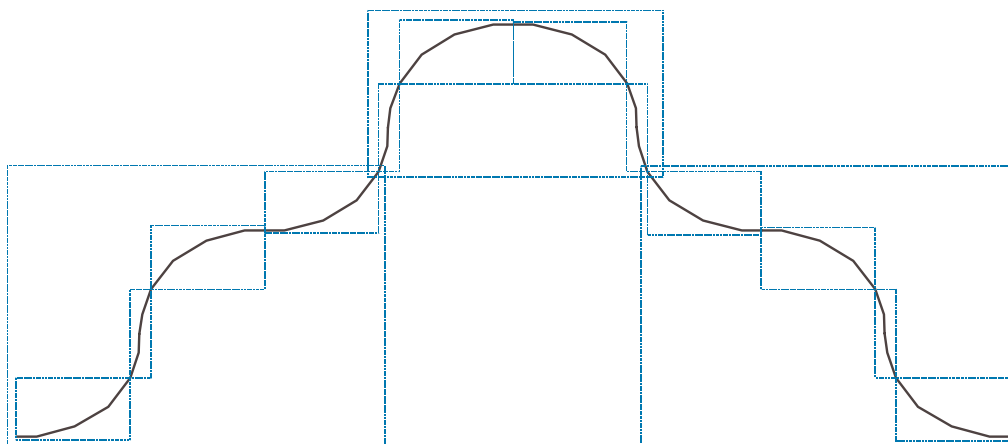


Figura 64. Organização hierárquica dos segmentos das polilinhas

Graças à coerência temporal, o processo pode ainda ser mais acelerado, utilizando informação relativa ao ciclo de simulação anterior. O processo de determinação da distância entre um veículo e uma polilinha começa por determinar a distância entre o veículo e o segmento da polilinha identificado como sendo o mais próximo durante o ciclo anterior de simulação. Esta distância permite depois eliminar rapidamente grandes grupos de segmentos mais distantes.

4.5.2 Estrada

No simulador de condução DriS, as redes de estradas que compõem os ambientes rodoviários são representadas por conjuntos de instâncias da classe EstradaTopológica. Esta classe deriva directamente da classe Estrada que permite representar estradas isoladas, conforme se apresenta na figura 65. A classe EstradaTopológica acrescenta à definição da estrada isolada a informação relativa à sua presença numa rede de estradas, nomeadamente a lista de cruzamentos com outras estradas.

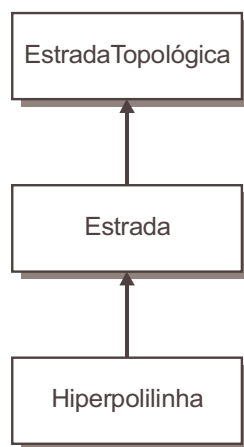


Figura 65. Hierarquia das classes utilizadas para a representação da rede viária

A classe Estrada, derivada da classe Hiperpolilinha (secção 4.5.1), permite representar uma estrada isolada, que assim é definida pela polilinha que representa o eixo da via, pela informação de perfil que será descrita na secção 4.5.3, e pela sinalização, como se apresenta na secção 4.5.4.

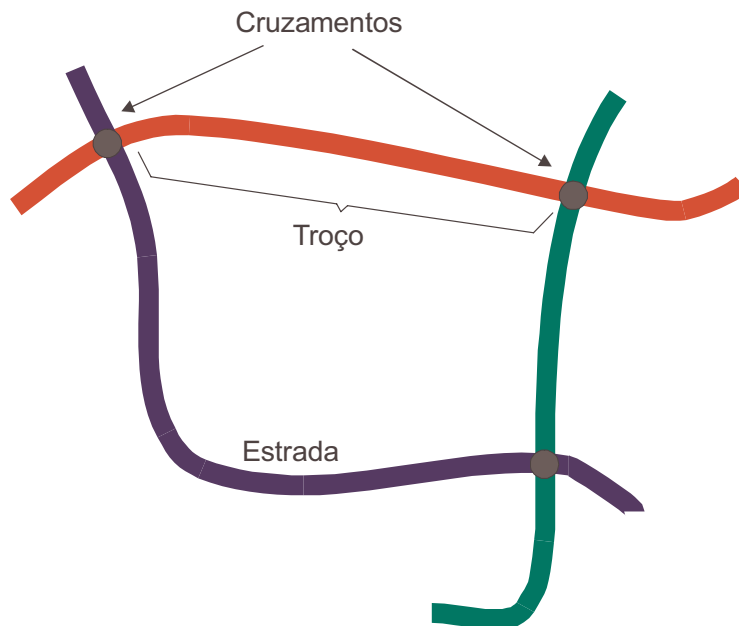


Figura 66. Rede viária

4.5.3 Perfil de estrada

Apesar de, na actual implementação da linguagem de especificação de ambientes rodoviários, apenas ser possível a especificação de um perfil para cada estrada, as estruturas de dados e as funcionalidades internas do simulador de condução DriS utilizam uma definição de perfil para cada segmento de estrada. Para isso, cada estrada tem associada uma lista de informações elementares de perfil, com um número de elementos igual ao número de nós utilizados na especificação da polilinha que define o eixo da via.

A informação de perfil consiste no número de vias e numa lista de separadores. Cada separador é representado por um tipo (traço contínuo, tracejado, etc.) e pela posição lateral relativamente ao eixo da via, como representado na figura 67.

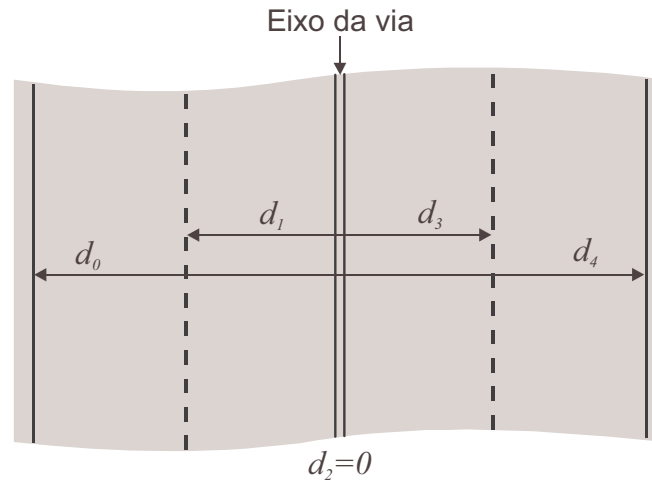


Figura 67. Definição das posições dos separadores

4.5.4 Sinalização

Os sinais de trânsito verticais são representados numa lista ordenada associada à estrada. Cada ocorrência de um sinal é armazenada em conjunto com a sua posição longitudinal, como se apresenta na figura seguinte.

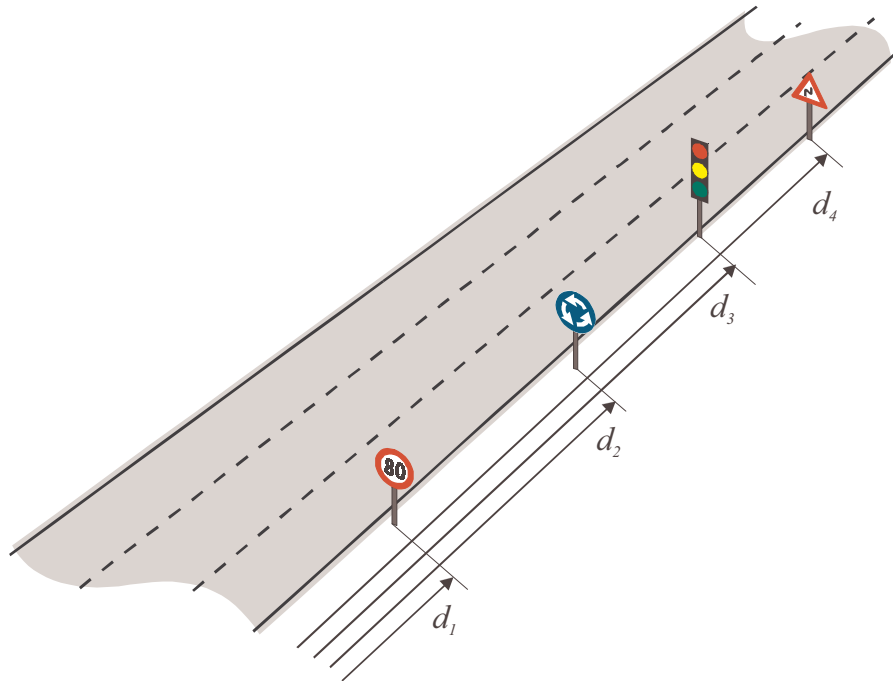


Figura 68. Definição da sinalização vertical e das respectivas posições longitudinais

Cada sinal é representado numa estrutura própria, que contém, para além do tipo de sinal, um campo que permite o armazenamento de um valor inteiro. Este campo é utilizado para a

identificação de parâmetros numéricos do sinal como distâncias ou limites de velocidade, ou para identificação do estado de elementos de sinalização luminosa.

4.5.5 Troço de estrada

Um troço de uma estrada é definido como a parte de uma estrada que liga dois cruzamentos consecutivos, conforme se assinala na figura 66. A definição de troços existe apenas nas estruturas internas do simulador. O preparador dos ambientes rodoviários não necessita de utilizar a definição destes elementos já que, como acontece também com os cruzamentos, as representações dos troços são obtidas pelo simulador de condução, durante a fase de pré-processamento.

A representação de um troço inclui os apontadores para a estrada a que pertence e para os dois cruzamentos nos extremos. A partir destes é fácil obter as posições longitudinais dos extremos na estrada respectiva.

A definição de troços é útil para a determinação de densidades de tráfego e outras variáveis destinadas à produção dos relatórios de saída.

4.5.6 Segmento de estrada

Um segmento de uma estrada corresponde à porção de uma estrada cujo eixo pode ser descrito por apenas um segmento de uma polilinha.

O segmento é definido pela polilinha que representa o eixo da via e pela respectiva informação de perfil.

Em termos de concepção, um segmento de uma estrada pode ser recto ou curvo. No entanto, devido às limitações já apresentadas da implementação da classe Polilinha, na versão actual admitem-se apenas segmentos rectos, existindo portanto a necessidade de decompor as curvas em vários segmentos rectos. Este ligeiro aumento de esforço necessário à especificação de ambientes resulta apenas de um estado de desenvolvimento não concluído e não de uma limitação conceptual. Toda a hierarquia de classes de dados criada para a especificação de ambientes permite tratar vias rodoviárias independentemente das primitivas utilizadas para a especificação do seu eixo. Para a utilização de primitivas de outro tipo bastará apenas a incorporação das funcionalidades respectivas na classe Polilinha.

4.5.7 Cruzamento

Um cruzamento é definido como a zona onde duas ou mais estradas se encontram. É representado pelas coordenadas do seu centro e por uma lista de identificadores dos segmentos das estradas a que está ligado. O centro do cruzamento é definido como a intersecção dos eixos das estradas envolvidas.

A fim de acelerar o processamento requerido para efectuar as alterações correspondentes a uma mudança de estrada, a estrutura do cruzamento armazena também a sua posição

longitudinal respeitante a cada uma das estradas que chegam ao cruzamento ou que dele partem.

4.5.8 Árvore de Objectos

Para permitir a coexistência da informação visual com a restante informação necessária à implementação da simulação, foi necessário readaptar as classes de dados disponibilizadas pelo *Performer*, de forma a adicionar as funcionalidades e os dados exigidos.

A classe *Objecto* foi derivada da classe *pfDCS* predefinida pelo *Performer*, e já referida na secção 2.7.3. A cada objecto ou tipo de objecto definido a partir de um ficheiro de descrição de cena em formato WDF, corresponderá uma instância da classe *Objecto*. Estas instâncias são armazenadas hierarquicamente de forma paralela à árvore de objectos normal utilizada nas aplicações baseadas no *Performer*. A estrutura de dados utilizada para a descrição de uma cena pode então ser representada por duas árvores paralelas e ligadas, como se apresenta na figura 69. Como normalmente a definição da geometria dos objectos elementares de uma cena é obtida a partir de ficheiros em formato standard, não existe duplicação nos nós inferiores da árvore de objectos. A duplicação só existe para nós definidos ou referenciados em ficheiros no formato WDF.

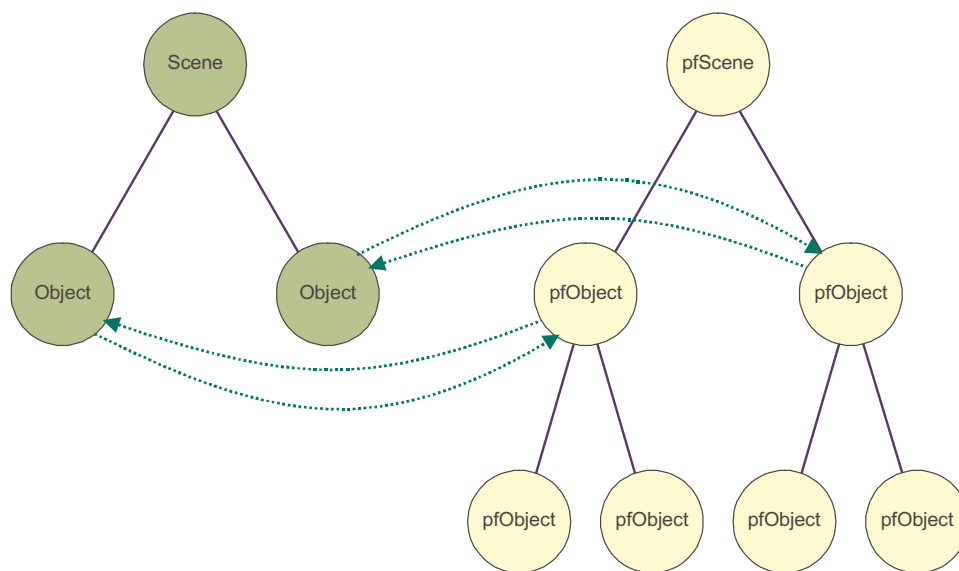


Figura 69. Árvore de objectos

A classe *Objecto* é caracterizada pelos seguintes campos:

- Nome - Identificador
- Tipo – Identificador do tipo
- Nó – Apontador para o nó correspondente à classe *Performer*
- Posição – posição inicial
- Orientação – Orientação inicial

- Escala – Factor de escalamento inicial
- Movimento – Apontador para a descrição do movimento
- Som – Apontador para descrição do som
- Filhos – Cabeça da lista ligada de objectos descendentes

Aproveitando as funcionalidades disponibilizadas pelas classes *Performer*, derivadas de *pfObject*, é sempre colocado, na estrutura *Performer*, o nome do objecto correspondente a cada instância da classe *Objecto*. O apontador da estrutura *Performer* para a instância da classe *Objecto* é armazenado utilizando a funcionalidade de definição de dados do utilizador, através da função *pfSetUserData*.

4.5.9 Movimentos

A associação de movimentos (ou comportamentos) a objectos do cenário de simulação é implementada pela associação de instância de classes de movimento aos elementos do tipo *Objecto*. Desta forma, apenas é possível atribuir movimentos a objectos referidos directamente num ficheiro de descrição em formato WDF.

Para implementar os diversos tipos de movimento desejados, foram desenvolvidas diversas classes derivadas de uma classe base *Movimento*. A figura 70 apresenta a hierarquia de derivação das classes utilizadas na descrição dos movimentos.

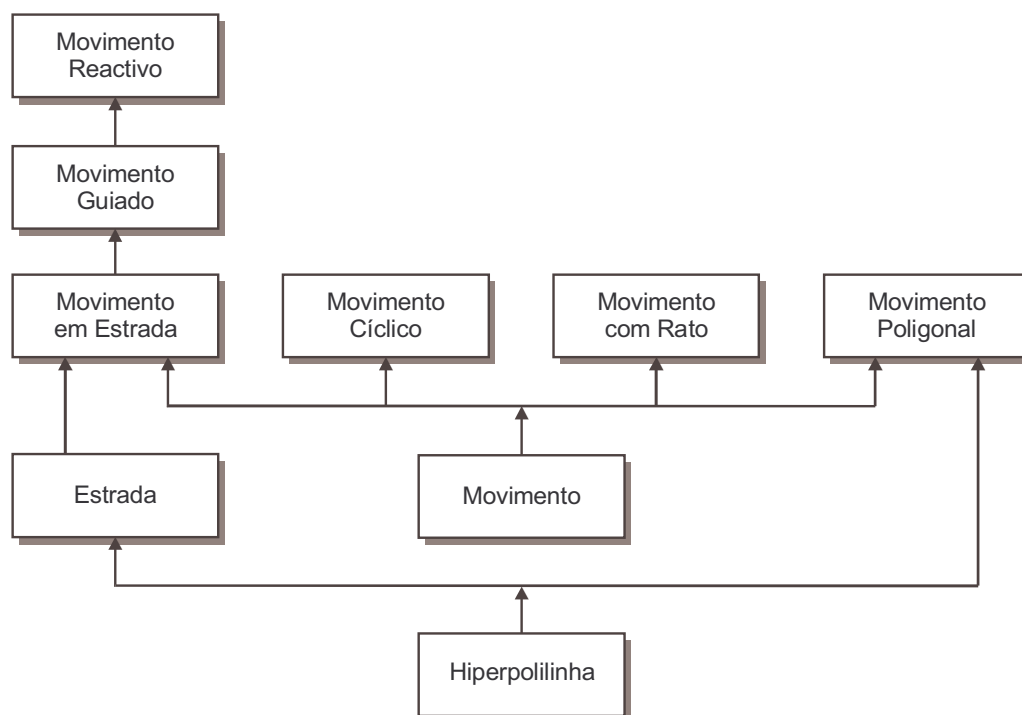


Figura 70. Hierarquia das classes de movimento

A classe Movimento não é utilizada directamente na especificação de movimento. Constitui apenas a base de onde são derivadas todas as outras classes de movimento. Implementa as funcionalidades de leitura do ficheiro, identificação, manipulação de matrizes de transformação e associação aos objectos da cena.

4.5.9.1 Movimento Cíclico

A classe Movimento Cíclico foi implementada com o objectivo essencial de facilitar a animação simples de objectos com percursos cíclicos predefinidos. É derivada da classe Movimento descrita anteriormente. Para definir os movimentos, esta classe utiliza uma tabela de movimentos elementares indexados pelo tempo. Os movimentos elementares admitidos são translações, rotações e escalamentos.

4.5.9.2 Movimento Poligonal

A classe de Movimento Poligonal foi implementada com o objectivo essencial de facilitar a animação simples de veículos com percursos em estrada. É derivada das classes Movimento e Hiperpolilinha descritas anteriormente, e utiliza a definição da polilinha herdada da classe Hiperpolilinha em conjunto com um valor de deslocamento para definir a trajectória da animação. Uma vez que a definição das estradas deriva também da classe Hiperpolilinha, os movimentos deste tipo podem partilhar as definições das polilinhas com as estradas. Desta forma, a especificação de movimentos de percurso predefinido em estrada torna-se uma tarefa muito simples.

Na implementação actual, as animações realizadas por instâncias desta classe são efectuadas com uma velocidade fixa, especificada pelo preparador da simulação.

4.5.9.3 Movimento com Rato

A classe Movimento com Rato destina-se a permitir o controlo interactivo de objectos utilizando o rato. Utiliza as funcionalidades disponibilizadas pela classe Xformer do *Performer*. A classe Xformer faz parte de uma biblioteca adicional de utilitários do *Performer* e implementa movimentos interactivos especificados pelo rato, que podem ser de três tipos:

- Fly
- Drive
- Trackball

O movimento do tipo Fly permite movimentar a câmara no espaço tridimensional utilizando os botões do rato para impor acelerações ou desacelerações segundo a direcção de visualização, e utilizando a posição do rato para impor alterações da orientação da câmara. O movimento do tipo Drive é idêntico, mas a deslocação vertical da câmara e a sua orientação são restringidas, de forma a que esta siga o terreno detectado. O movimento do tipo Trackball permite a manipulação directa da direcção e da posição de visualização através do movimento do rato.

4.5.9.4 Movimento em Estrada

A classe de Movimento em Estrada não é utilizada directamente para a especificação de movimentos. Constitui apenas a base de onde são depois derivadas as classes Movimento Reactivo e Movimento Guiado. Deriva directamente das classes Movimento e Estrada.

Inclui as funcionalidades de determinação das posições lateral e longitudinal na estrada, a pesquisa de veículos e sinais próximos, e o cálculo da distância para o próximo cruzamento.

4.5.9.5 Movimento Guiado

Esta classe permite associar a um objecto (normalmente um veículo) um movimento interactivo típico de um veículo. Inclui as funcionalidades de recolha da informação proveniente da monitorização dos instrumentos do posto de condução e de envio da informação para o painel do veículo. A classe de movimento guiado é também responsável pela simulação do modelo dinâmico do veículo que será tratada na secção respectiva.

4.5.9.6 Movimento Reactivo

A classe de Movimento Reactivo destina-se a implementar o movimento dos veículos utilizados normalmente no povoamento dos ambientes rodoviários típicos das vias públicas.

Esta classe deriva da classe de Movimento Guiado descrita anteriormente. Estas duas classes diferem uma da outra essencialmente na proveniência dos dados de accionamento dos instrumentos do posto de condução. Enquanto a classe Movimento Guiado recolhe estes dados de um posto de condução externo, a classe Movimento Reactivo apoia-se no módulo de simulação comportamental para obter as posições dos pedais e do volante. A metodologia utilizada por este módulo e a sua implementação serão tratadas no capítulo 5.

4.6 Posto de condução

Num simulador de condução, o contacto entre o condutor humano e o ambiente virtual é implementado pelo conjunto da imagem apresentada e pelo posto de condução. Este elemento é portanto fundamental para o realismo da simulação.

O actual posto de condução foi implementado com o objectivo de assegurar o funcionamento provisório do simulador até à disponibilização do posto de condução definitivo, baseado no corpo de um veículo real. Foi portanto dada uma forte importância à funcionalidade, mas sem grandes preocupações em termos de realismo [Leal96].

O posto de condução actual é constituído por um volante de dimensões reduzidas e curso muito limitado e por um conjunto de 3 pedais também de dimensões reduzidas. A apresentação dos mostradores habituais é feita num monitor de um computador do tipo PC. Este PC é também utilizado na aquisição de sinais do volante, pedais e restante equipamento, através de uma placa de aquisição de sinais e de uma aplicação desenvolvida especialmente para o efeito. A aquisição destes sinais está também dependente de um módulo de interface implementado para o efeito numa placa de contactos (*Breadboard*).

Este módulo está ligado à base do volante e ao conjunto dos pedais por cabos curtos, rígidos e sem conectores de ligação. A ligação ao PC é feita por mangas tipo *flatcable*. A ligação do PC à estação gráfica é efectuada por rede Ethernet a 10 Mbits/s.

A actual implementação do posto de condução apresenta as seguintes deficiências:

- As dimensões reduzidas do volante prejudicam o realismo.
- O curso limitado do volante impede a simulação de curvas apertadas ou dificulta a controlabilidade do veículo.
- As dimensões reduzidas do conjunto de pedais dificultam a condução.
- A falta de rigidez do módulo de interface prejudica fortemente a fiabilidade de todo o sistema.
- O comprimento dos cabos de ligação e a sua rigidez dificultam a mobilidade do posto de condução.
- A ausência do restante equipamento envolvente prejudica o realismo da simulação.

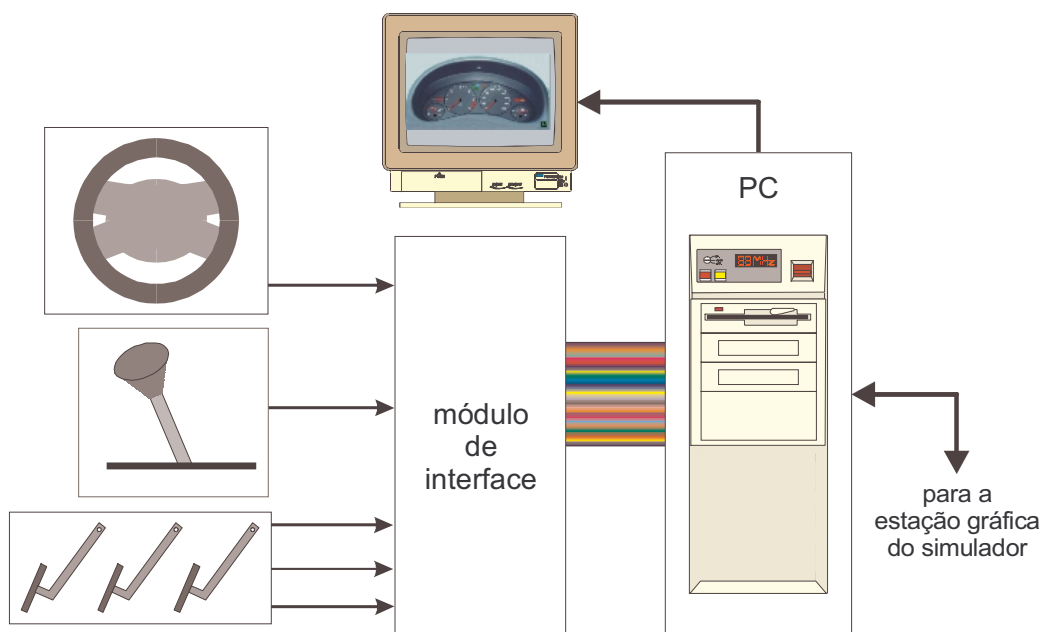


Figura 71. Posto de condução

Para a apresentação do painel de instrumentos no ecrã do computador utilizou-se uma imagem processada a partir de uma fotografia de um painel de instrumentos de um veículo real. Os ponteiros e os sinais luminosos são depois desenhados em tempo real, de acordo com as informações sobre o estado do veículo recebidas da resolução do modelo do veículo (figura 72). A imagem dos ponteiros é alterada dinamicamente de maneira a reproduzir o efeito da sombra devida à presença de uma fonte luminosa numa posição fixa.



Figura 72. Painel de instrumentos

Está previsto o melhoramento do posto de condução para uma nova versão provisória, tendo em vista a manutenção do funcionamento do simulador durante o período de desenvolvimento da versão definitiva.

Este melhoramento consiste na implementação de um novo posto de condução do mesmo tipo do já existente. Será utilizado um exemplar dos postos de condução destinados a sistemas lúdicos de entretenimento, com feed-back de força activo. O módulo de interface, actualmente implementado em placa de contactos, será refeito em placa de circuito impresso, ou eliminado através de uma nova arquitectura de aquisição de sinais. As ligações dos diversos componentes serão efectuadas com cabos flexíveis apetrechados com conectores em ambos os extremos. Será assim possível:

- aumentar a fiabilidade do posto de condução;
- fornecer feed-back de força no volante;
- disponibilizar um volante de maiores dimensões e de curso mais longo;
- disponibilizar um conjunto de pedais mais amplo;
- aumentar a mobilidade do posto de condução;
- dispor de um posto de condução de backup (o actual).

4.7 Modelo do veículo

Devido às considerações apresentadas na secção 2.3 sobre o nível de realismo necessário para a simulação dinâmica e face aos recursos disponíveis, foi implementado um modelo de um veículo automóvel híbrido, que utiliza simulação dinâmica apenas na determinação da componente longitudinal do movimento. A orientação no plano horizontal do veículo é depois determinada no módulo de direcção com base em simulações cinemáticas do movimento esperado para o veículo. Finalmente, a inclinação do veículo é determinada a

partir de considerações puramente geométricas. O modelo do veículo é portanto estruturado em três blocos funcionais principais, como se apresenta na figura 73.



Figura 73. Estrutura do modelo do veículo

4.7.1 Modelo dinâmico longitudinal

A estrutura do modelo dinâmico longitudinal é apresentada na figura 74, onde podem ser identificados os dois blocos principais: a mecânica interna do veículo e a dinâmica do seu corpo.

O bloco da mecânica interna incorpora as descrições dos componentes mecânicos internos fundamentais de um veículo, nomeadamente o motor, a embraiagem, a caixa de velocidades, o travão e ainda um controlador automático da caixa de velocidades (CACV). As informações recebidas dos pedais e da alavanca de velocidades são utilizadas pelos módulos respectivos para determinar o binário fornecido às rodas tractoras.

O bloco da dinâmica do corpo do veículo limita o binário recebido nas rodas em função da aderência dos pneus ao pavimento, combina a força resultante com as devidas à gravidade e ao atrito e determina a componente longitudinal da velocidade do veículo. Considera-se portanto, nesta implementação, que o veículo não possui qualquer movimento de deslizamento lateral.

As secções seguintes destinam-se à descrição de cada um dos módulos do modelo dinâmico longitudinal.

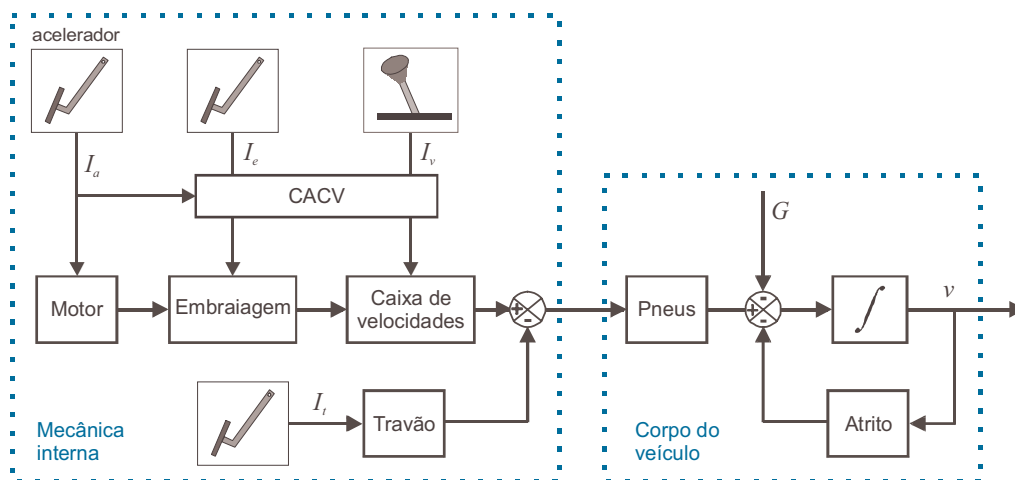


Figura 74. Modelo dinâmico longitudinal

4.7.1.1 Motor

O modelo do motor pode ser considerado um bloco que recebe como entrada a posição do acelerador (I_a na figura 74) e fornece como saída um binário motor. Internamente mantém uma variável de estado fundamental que é a velocidade de rotação.

Dada a complexidade mecânica dos motores utilizados actualmente nos veículos automóveis, a concepção de um modelo capaz de reproduzir fielmente a resposta de um destes sistemas seria um projecto, só por si, complexo. A resolução de um modelo que considere todos os fenómenos físicos que se passam dentro de um motor durante o seu funcionamento normal dificilmente seria pois efectuada em tempo real.

Nos simuladores de condução existem alguns requisitos que os modelos dos motores devem satisfazer de forma a manter a percepção humana do acto de condução e consequentemente o desempenho do condutor.

Alguns parâmetros do funcionamento de um motor como a velocidade de rotação em vazio (*ralenty*) podem ser considerados mais sensíveis, uma vez que um desajuste no seu valor é rapidamente sentido pelo condutor. Estes parâmetros mais sensíveis devem poder ser facilmente explicitados pelo preparador da experiência de simulação de condução. Nos modelos de mais baixo nível, estes parâmetros resultam de uma simulação interna do motor, pelo que se torna difícil a previsão do seu valor sempre que se procede à alteração de qualquer parâmetro físico.

De forma a facilitar ao máximo o trabalho de preparação das experiências, optou-se por criar um modelo de um motor que relaciona a saída com as entradas em função de curvas de resposta que podem ser completamente especificadas pelo preparador da experiência. Estas curvas são armazenadas num ficheiro de texto e podem ser alteradas através de um editor com apresentação gráfica, desenvolvido especialmente para o efeito [Vandamme96]. A figura 75 apresenta a janela principal deste editor.

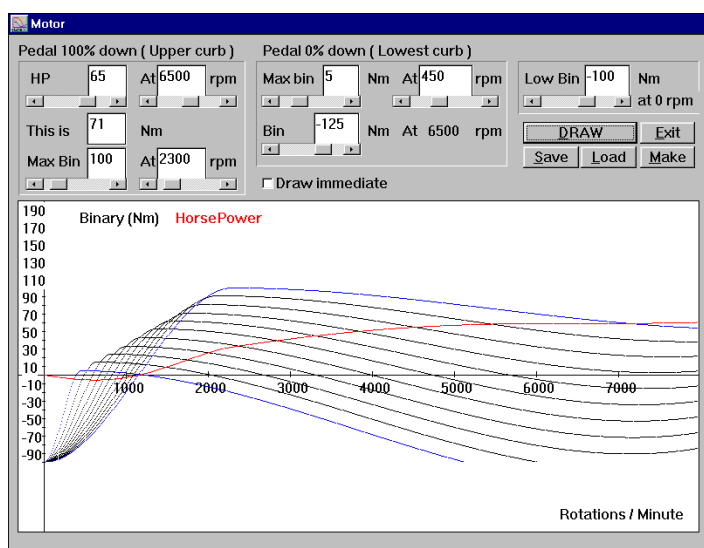


Figura 75. Editor de curvas de binário - primeira versão

O editor permite especificar rapidamente um conjunto de curvas de binário a partir dos valores mais significativos, que são:

- o binário máximo ($Bin_{\max}$)
- a rotação a que o binário se torna máximo (w_b)
- a potência máxima ($P_{\max}$)
- a rotação a que se obtém a potência máxima (w_p)
- a velocidade de *ralenty* (w_0)
- o binário resistente com o motor parado (Bin_0)

A partir destes dados, e conhecendo a relação entre a Potência (P), o binário (Bin) e velocidade angular (w) dada pela equação (16), podemos obter mais alguns dados.

$$P = w \cdot Bin \quad (16)$$

No ponto de potência máxima existirá um binário Bin_p que pode ser dado por:

$$Bin_p = \frac{P_{\max}}{w_p} \quad (17)$$

Por outro lado, a derivada do binário em ordem à velocidade angular, é facilmente relacionada com a derivada da potência em ordem à mesma velocidade angular, como se mostra na equação (18).

$$\frac{\partial Bin}{\partial w} = Bin' = \frac{P' \cdot w - P \cdot w'}{w^2} = \frac{P' \cdot w - P}{w^2} \quad (18)$$

No ponto de potência máxima, sabe-se que a derivada da potência em ordem à velocidade angular tem de ser nula:

$$\frac{\partial P_{\max}}{\partial w} = P'_{\max} = 0 \quad (19)$$

É então possível obter o valor da derivada do binário no ponto de potência máxima, aplicando os valores respectivos na equação (18).

$$\frac{\partial Bin_p}{\partial w} = -\frac{P_{\max}}{w_p^2} \quad (20)$$

Com estes dados e assumindo por defeito alguns outros valores, ficam a ser conhecidos alguns pontos das curvas de binário, assim como os valores da sua derivada no mesmo ponto.

- $w=0$, $Bin=Bin_0$ é um ponto comum a todas as curvas;
- $w=w_0$, $Bin=0$, $I_a=0$ é o ponto de *ralenty*;
- $w=w_b$, $Bin=Bin_{\max}$, $I_a=100\%$ é o ponto do binário máximo;

- $w=w_p$, $Bin=Bin_p$, $I_a=100\%$ é o ponto de potência máxima.

Todas as curvas de binário são coincidentes para rotações próximas de 0 r.p.m. Isto significa que, como é evidente, quando o motor está parado o acelerador não possui qualquer efeito. Em rigor, para estas velocidades de rotação muito próximas de zero, o efeito de atrito torna-se essencial, pelo que o local geométrico onde os pontos de funcionamento se podem localizar deixa de poder ser representado por uma curva. Isto é, deixamos de poder determinar o binário apresentado pelo motor apenas pelo conhecimento da velocidade de rotação e da posição do acelerador.

Genericamente, todas as curvas intersectam o eixo das rotações em dois pontos. Se considerarmos o motor como sistema isolado, todos estes pontos de intersecção podem ser designados por pontos de equilíbrio para a respectiva posição do acelerador. Isto é, uma vez atingido um destes pontos, o binário torna-se nulo, pelo que o sistema continuará no mesmo ponto de funcionamento até que o seu equilíbrio seja desfeito por uma perturbação externa. No entanto, nem todos estes pontos de equilíbrio são semelhantes. Os pontos de equilíbrio localizados no segmento descendente da curva de binário designam-se por pontos de equilíbrio estável, uma vez que o sistema tende a contrariar os efeitos que possam surgir por pequenas perturbações, recolocando o ponto de funcionamento no equilíbrio. Inversamente, nos pontos de equilíbrio dos segmentos ascendentes das curvas de binário, o sistema reage a uma possível pequena perturbação, gerando um efeito que se adiciona à perturbação verificada, e levando o sistema a abandonar o ponto de equilíbrio.

Alguns destes pontos possuem uma importância especial, pelo que importa referir o seu significado.

O ponto de equilíbrio estável da curva correspondente ao acelerador libertado é conhecido como o ponto de *ralenty*. Representa o ponto de funcionamento do motor quando se encontra em situação de esforço nulo e com o acelerador na posição de repouso.

O ponto onde as curvas intersectam o eixo vertical está relacionado com a força necessária para colocar o motor em movimento quando este não se encontra em funcionamento. É natural assumir que esta força se mantém independente da velocidade angular, para pequenas velocidades de rotação, pelo que se considera nula a derivada das curvas de binário no ponto $w=0$.

O ponto de equilíbrio estável da curva correspondente à posição máxima do acelerador corresponde à rotação máxima que o motor consegue atingir como sistema isolado.

A figura seguinte apresenta a janela principal de uma nova versão do editor de curvas de binário descrito em [Baptista97]. Esta versão permite manipular gráfica ou numericamente as curvas superior e inferior. O preparador da experiência pode ainda especificar a derivada pretendida para um ponto qualquer destas duas curvas.

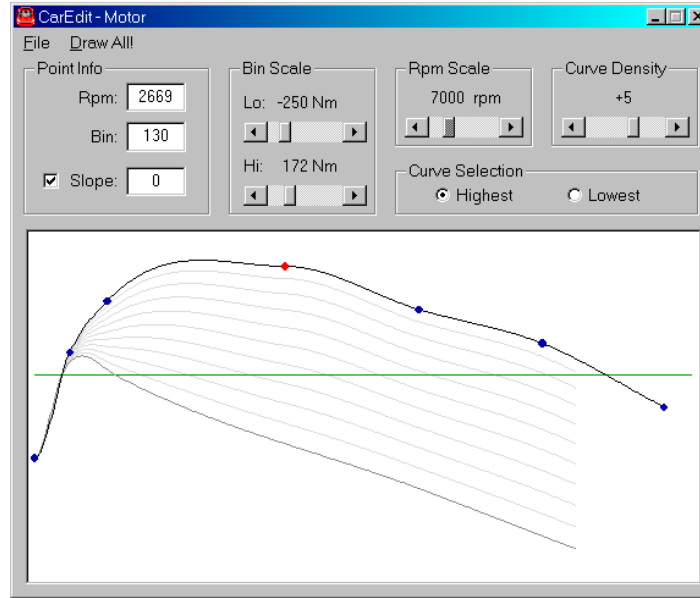


Figura 76. Novo editor de curvas de binário

As restantes curvas intermédias são determinadas por uma simples interpolação, cuja linearidade pode ser controlada interactivamente pelo preparador da experiência.

4.7.1.2 Transmissão

O modelo da transmissão simula a relação mecânica entre o motor e as rodas tractoras, provocada pela caixa de velocidades e pelos restantes elementos que compõem a transmissão.

Assumindo que não existe torção nos elementos mecânicos que compõem a transmissão, existe uma proporcionalidade constante entre a velocidade angular do motor (w_m) e a velocidade angular das rodas tractoras (w_r).

$$w_r = R_t \cdot w_m \quad (21)$$

Esta relação de transmissão total (R_t) pode ser decomposta no produto de dois factores, como se indica na equação (22). Um factor variável (R_g), dependente da engrenagem engatada na caixa de velocidades (I_v) e outro fixo (R_f) que representa os restantes elementos da transmissão.

$$R_t = R_g \cdot R_f \quad (22)$$

4.7.1.3 Embraiagem

Ao contrário do que acontece noutros continentes, em Portugal e na generalidade dos países Europeus, as transmissões com caixa de velocidades manual são a solução adoptada na grande maioria dos veículos automóveis. Este tipo de transmissão necessita de uma

embraiagem para permitir desacoplar o motor da transmissão, de forma a permitir as comutações de engrenagens na caixa de velocidades.

O modelo da embraiagem utilizado no simulador DriS foi concebido como um módulo cuja entrada é o binário potente disponibilizado pelo motor e cuja saída é o binário fornecido à cadeia de transmissão. A sua funcionalidade pode ser explicada a partir do modelo clássico de embraiagem composta por dois discos paralelos cuja pressão um contra o outro é regulada pelo pedal respectivo.

Os binários motores inferiores a um determinado valor dependente do coeficiente de atrito estático entre os discos são transmitidos totalmente da entrada para a saída. Quando o referido valor é atingido, os discos passam a ter movimento relativo, pelo que passa a funcionar o atrito dinâmico, que se assume como sendo invariável com a velocidade relativa. Assim, o binário transmitido da entrada para a saída é reduzido para um valor inferior.

Para facilitar a parametrização do modelo da embraiagem, foi desenvolvido um editor interactivo cuja janela principal se apresenta na figura 77.

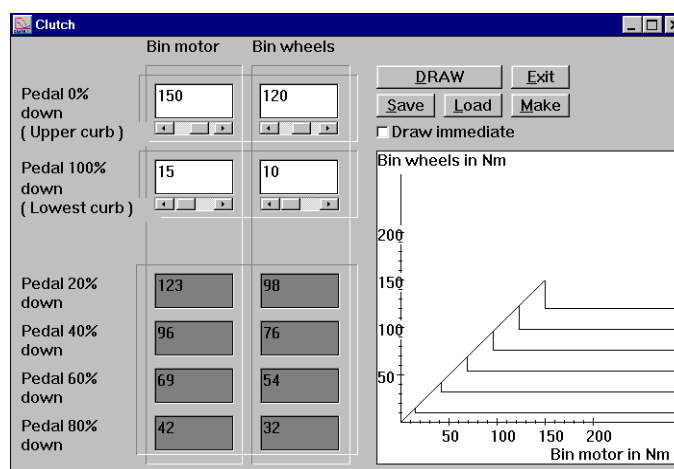


Figura 77. Editor de curvas de resposta da embraiagem

Este editor foi desenvolvido como uma aplicação MS-Windows 95 e permite editar, gravar, recuperar e visualizar graficamente as curvas de resposta do pedal de embraiagem [Vandamme96]. Estas curvas são depois importadas pelo modelo do veículo do simulador.

4.7.1.4 Travão

Para facilitar a parametrização do modelo do travão, foi desenvolvido um editor interactivo cuja janela principal se apresenta na figura 78.

Este editor foi desenvolvido como uma aplicação Win95 e permite editar, gravar, recuperar e visualizar graficamente as curvas de resposta do pedal do travão [Vandamme96]. Estas curvas são depois importadas pelo modelo do veículo do simulador.

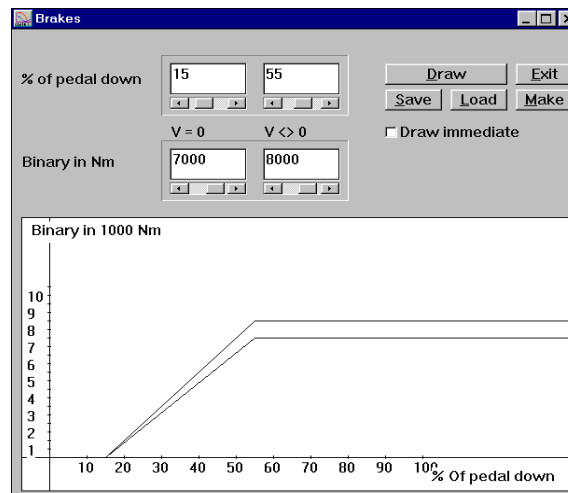


Figura 78. Editor de curvas de binário de travagem

As duas curvas representam, respectivamente, o binário estático (rodas paradas) e o binário dinâmico (rodas em movimento) em função da posição do pedal do travão.

4.7.1.5 Caixa de velocidades automática

Como foi já referido, não é vulgar encontrar nos veículos que circulam no nosso país este elemento mecânico. Uma vez que o simulador se destina essencialmente à implementação virtual de situações de tráfego realistas para o ambiente nacional, poder-se-ia questionar a necessidade de implementação do modelo de simulação deste componente mecânico. À primeira vista a utilização deste módulo pode ser vista como supérflua e até como desadequada à implementação realista das situações típicas das estradas Portuguesas. No entanto, existem diversas razões que motivaram a decisão de implementar este módulo e de facultar a sua utilização opcional no veículo sujeito.

A simulação realista de veículos automóveis exige a consideração dos efeitos da caixa de velocidades, logo esta terá de ser manipulada. No caso do veículo sujeito é fácil assumir que o condutor humano desempenha estas funções, mas, no caso dos outros veículos autónomos, o problema põe-se de outra forma. Nestes veículos, para se conseguir a simulação dos efeitos do manuseamento da caixa de velocidades, é necessário optar por uma de duas soluções. Ou consideramos que o veículo possui uma caixa de velocidades automática, ou consideramos que a caixa é manual e que o condutor virtual que dirige o veículo opera também o elemento caixa de velocidades. Em qualquer dos casos, a implementação do módulo de comutação de engrenagens na caixa de velocidades teria que ser desenvolvido, ficando depois associado ao modelo do automóvel ou ao modelo comportamental do condutor.

Outra razão que levou a optar pela implementação do controlador automático da caixa de velocidades foi a constatação de que a grande maioria dos estudos de simulação realizados em simuladores de condução não requer o realismo microscópico adicional que é obtido pela utilização da caixa de velocidades manual. Muitas experiências destinam-se ao estudo

de reacções tácticas dos condutores e, nestes casos, apenas é fundamental que o condutor seja capaz de cumprir operacionalmente as decisões tácticas que toma.

Para além destas razões, a disponibilidade do controlador automático da caixa de velocidades permite uma condução mais simples, o que se torna muito útil nas fases de ensaio e de ambientação, sobretudo quando há a necessidade de ensaio de grande número de condutores.

Uma caixa de velocidades automática pode ser decomposta numa caixa de velocidades propriamente dita e num módulo controlador. A funcionalidade da caixa de velocidades é exactamente a descrita na secção 4.7.1.2. A entrada deste elemento mecânico é agora obtida do módulo controlador designado por CACV (controlador automático de caixa de velocidades), esquematizado na figura 79. Este módulo recebe como entradas o ponto de funcionamento do motor dado pela rotação e pelo binário e as posições dos pedais acelerador e travão. Controla também a embraiagem, pelo que o pedal respectivo fica fora de uso quando se utiliza a caixa de velocidades automática.

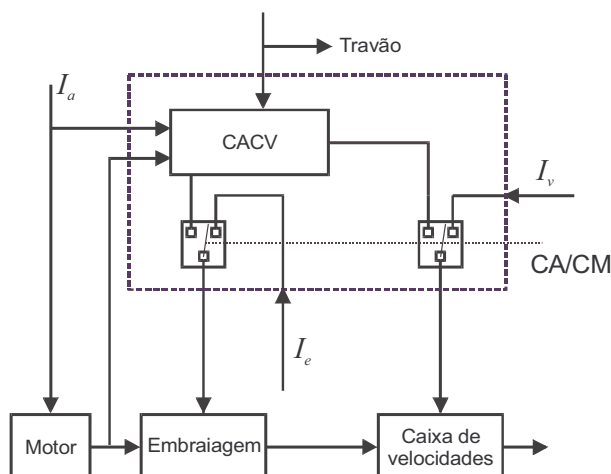


Figura 79. Controlo automático da caixa de velocidades

São definidas duas regiões de comutação de engrenagem da caixa de velocidades (Z1 e Z2), limitadas pelas rectas f_1 e f_2 , conforme se apresenta no gráfico da figura 80. Este gráfico representa o espaço de funcionamento do motor, definido pela sua velocidade angular (w_M) e pela posição do pedal acelerador (I_a).

Em situação normal de condução, o ponto de funcionamento do motor estará localizado na zona limpa (Z0). Por aumento da pressão no acelerador ou por diminuição da velocidade angular provocada por exemplo por um aumento do declive do terreno, o ponto de funcionamento pode descer até à zona Z2. Sempre que o ponto de funcionamento for detectado nesta zona é ordenada uma passagem de caixa no sentido descendente da velocidade. Esta alteração provocará um aumento da velocidade angular do motor, recolocando o ponto de funcionamento na zona Z0. Quando o ponto de funcionamento for detectado na zona Z1, o módulo CACV ordena uma passagem de caixa no sentido

ascendente de velocidade. Isto pode acontecer por uma diminuição na pressão exercida sobre o acelerador ou por um aumento de rotação do motor.

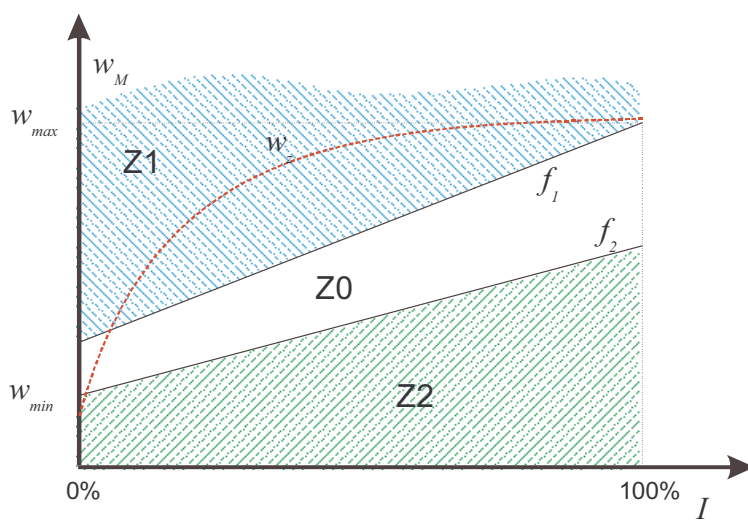


Figura 80. Resposta do módulo de controlo automático da caixa de velocidades (CACV)

As rectas f_1 e f_2 , devem ser especificadas em função das características do motor. O valor da recta f_1 para $I_a=100\%$ representa a velocidade de rotação máxima (w_{max}) admitida para o motor. A velocidade de rotação mínima (w_{min}) corresponde ao valor da recta f_2 , quando $I_a=0\%$

4.7.1.6 Peso

Este módulo determina, de forma aproximada, a componente da força gravítica na direcção do movimento longitudinal. Para isso, utiliza-se exclusivamente o valor conhecido para a massa do veículo (m), a aceleração da gravidade terrestre ($g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) e a inclinação frontal do veículo (γ) determinada pelo módulo seguidor do terreno (ver secção 4.8), conforme se indica na equação (23), e de acordo com a figura 81.

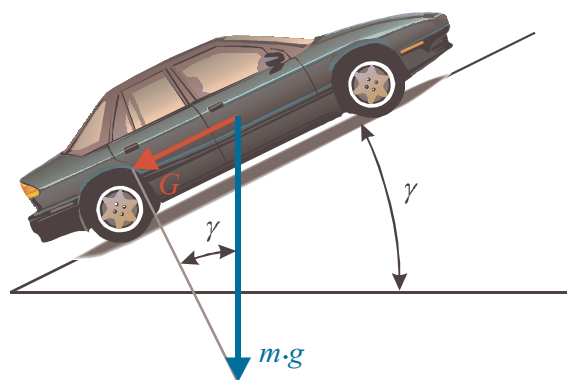


Figura 81. Determinação da componente do peso que influencia o movimento longitudinal

$$G = m \cdot g \cdot \sin \gamma \quad (23)$$

A utilização do ângulo de inclinação frontal do veículo (γ) consiste numa aproximação, normalmente aceitável, mas que pode originar erros significativos em situações pontuais. A determinação correcta do efeito da gravidade obrigaria a uma amostragem do declive do terreno nos pontos de contacto com todas as rodas do veículo. A figura 82 apresenta uma situação onde a utilização do ângulo de inclinação frontal produz um resultado incorrecto, que assume até um sinal contrário ao da força longitudinal correcta, dado que a inclinação do veículo é contrária à inclinação do terreno nos pontos de contacto com as rodas.

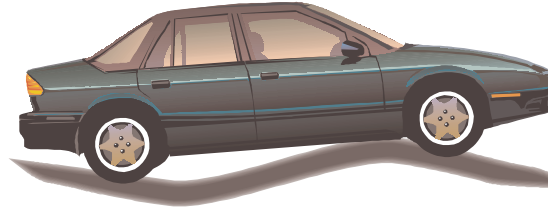


Figura 82. Situação crítica para a utilização do ângulo de inclinação frontal (γ)

4.7.1.7 Atrito

A força de atrito causada pela fricção atmosférica, pelos elementos de rolamento das rodas e pelo contacto das rodas no solo foi modelado simplesmente como uma força longitudinal de direcção contrária ao movimento e módulo igual à soma de uma componente fixa (F_0) com uma componente proporcional ao módulo da velocidade:

$$F_a = F_0 + \mu \cdot v \quad (24)$$

4.7.1.8 Dinâmica do corpo do veículo

O módulo da dinâmica do corpo do veículo é o responsável pela actualização do valor da velocidade longitudinal a partir do conhecimento da força motora (F_m) e das restantes forças que lhe estão aplicadas. A equação (25) descreve a dinâmica do corpo do veículo.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_m - F_a - G}{m} \quad (25)$$

O valor da velocidade é actualizado pela integração temporal da aceleração dada pela equação (25), conforme se mostra na equação (26).

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \Delta v \quad (26)$$

onde:

$$\Delta v = \int_t^{t+\Delta t} \frac{dv}{dt} \cdot dt = \int_t^{t+\Delta t} \frac{F_m - F_a - G}{m} \cdot dt \quad (27)$$

Assumindo que os valores obtidos para a força motora (F_m), a força de atrito (F_a) e a componente longitudinal da força gravítica (G) se mantêm constantes para todo o período de integração Δt , a variação de velocidade no mesmo período pode ser determinada pela equação (28), correspondente à simplificação da equação (27).

$$\Delta v = \frac{F_m - F_a - G}{m} \cdot \int_t^{t+\Delta t} dt = \frac{F_m - F_a - G}{m} \cdot \Delta t \quad (28)$$

4.7.2 Modelo cinemático

Conhecido o valor da velocidade longitudinal (v), determinado a partir das equações (26) e (28), cabe agora ao modelo cinemático actualizar a posição do veículo, tendo em conta a orientação deste e as alterações de direcção impostas pela actuação do volante.

O modelo cinemático pode ser descrito em dois blocos independentes. O bloco da direcção utiliza o ângulo de rotação que é imposto ao volante para determinar a taxa de curvatura com que o veículo deve ser afectado. Em seguida, o bloco de integração realiza a integração numérica da velocidade e da curvatura para determinar a posição e a orientação do veículo.

4.7.2.1 Direcção

Nos veículos automóveis usuais, as mudanças de direcção são asseguradas pela alteração da orientação das duas rodas da frente. Durante uma curva, as rodas efectuem percursos em arco de circunferências concêntricas mas com raios distintos, conforme se ilustra na figura seguinte.

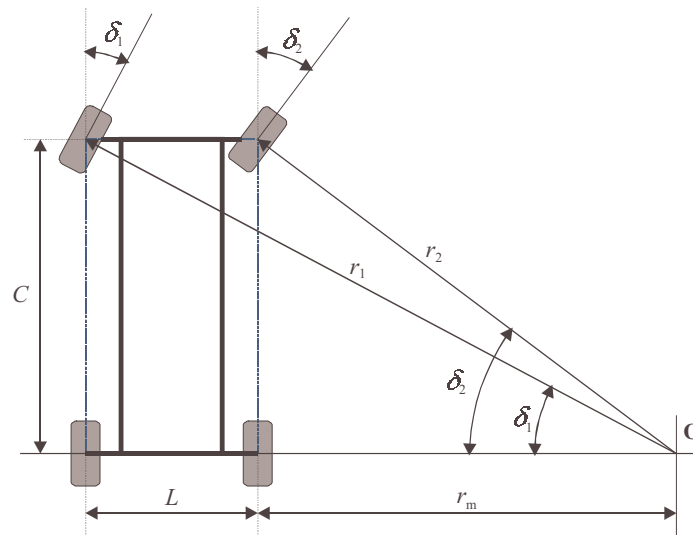


Figura 83. Esquema da direcção

Onde:

δ_l = ângulo de viragem da roda de fora [rad]

δ_2 = ângulo de viragem da roda de dentro [rad]

r_m = raio de curvatura da roda interior traseira [m]

C = comprimento do veículo [m]

L = largura do veículo [m]

O = centro de curvatura

A relação entre os ângulos de direcção das rodas da frente pode ser obtida pela análise da geometria apresentada na figura 83.

$$L = r_1 \cdot \cos \delta_1 - r_2 \cdot \cos \delta_2 \quad (29)$$

Os raios interior e exterior dos arcos descritos pelas rodas da frente (r_2 e r_1 respectivamente), podem também ser relacionados com os ângulos de direcção da roda respectiva, conforme se indica na equação (30).

$$\begin{cases} \sin \delta_1 = \frac{C}{r_1} & \Leftrightarrow & r_1 = \frac{C}{\sin \delta_1} \\ \sin \delta_2 = \frac{C}{r_2} & \Leftrightarrow & r_2 = \frac{C}{\sin \delta_2} \end{cases} \quad (30)$$

Aplicando estas duas últimas igualdades na equação (29), obtém-se a equação (31).

$$L = \frac{C}{\sin \delta_1} \cdot \cos \delta_1 - \frac{C}{\sin \delta_2} \cdot \cos \delta_2 = \frac{C}{\tan \delta_1} - \frac{C}{\tan \delta_2} \quad (31)$$

Ou, resolvendo em ordem à co-tangente de um dos ângulos de direcção, obtém-se a equação (32).

$$\cotan \delta_2 = \frac{C - L \cdot \tan \delta_1}{C \cdot \tan \delta_1} = \cotan \delta_1 - \frac{L}{C} \quad (32)$$

Para evitar o tratamento, sem vantagem evidente, de cada uma das variáveis em duplicado (para as rodas do lado direito e do lado esquerdo), podemos utilizar uma simplificação conhecida como a aproximação modelo de bicicleta [Kelly94]. Nesta aproximação geometricamente equivalente, consideram-se apenas 2 rodas colocadas no centro do veículo como se encontra representado na figura 84.

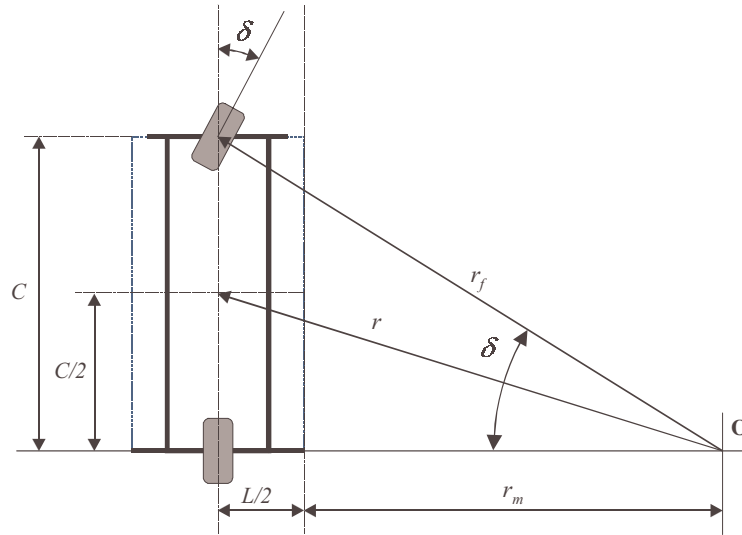


Figura 84. Aproximação ao modelo de bicicleta

Neste modelo, o ângulo de viragem imposto à roda da frente (δ) está relacionado com o raio de curvatura (r_m) e com as dimensões do veículo, de acordo com a equação (33).

$$\tan \delta = \frac{C}{r_m + \frac{L}{2}} \Leftrightarrow r_m = \frac{C}{\tan \delta} - \frac{L}{2} \quad (33)$$

O raio da curvatura descrita pelo centro geométrico do carro (r) é dado pela equação (34):

$$r = \sqrt{\left(r_m + \frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{C}{2}\right)^2} = C \cdot \sqrt{\cotan^2 \delta + \frac{1}{4}} \quad (34)$$

É também possível exprimir os ângulos de viragem de cada uma das rodas da frente do modelo de quatro rodas em função do ângulo de viragem equivalente do modelo de bicicleta, conforme se indica na equação (35).

$$\begin{cases} \tan \delta_1 = \tan \delta \cdot \frac{r_m + L/2}{r_m + L} \\ \tan \delta_2 = \tan \delta \cdot \frac{r_m + L/2}{r_m} \end{cases} \quad (35)$$

Substituindo o valor do raio mínimo (r_m) dado pela equação (33), obtém-se a equação (36) que permite relacionar os ângulos de cada uma das rodas da frente com o ângulo de viragem equivalente do modelo de bicicleta, em função apenas da geometria do veículo.

$$\begin{cases} \tan \delta_1 = \frac{2 \cdot C \cdot \tan \delta}{2 \cdot C + L \cdot \tan \delta} \\ \tan \delta_2 = \frac{2 \cdot C \cdot \tan \delta}{2 \cdot C - L \cdot \tan \delta} = \frac{C \cdot \tan \delta}{C - \frac{L}{2} \cdot \tan \delta} \end{cases} \quad (36)$$

Uma vez que o raio de curvatura assume valores infinitos quando o ângulo de viragem é nulo, é conveniente utilizar como alternativa o valor da curvatura (κ). Esta curvatura pode ser obtida em função do ângulo de viragem imposto à roda da frente, como se indica na equação (37).

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{1}{C \cdot \sqrt{\cotan^2 \delta + \frac{1}{4}}} = \frac{\tan^2 \delta}{C \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{4} \cdot \tan^2 \delta}} \quad (37)$$

Este valor da curvatura (κ) que se mede em m^{-1} equivale à taxa de variação angular por unidade de percurso, como se define na equação (38).

$$\kappa = \frac{d\theta}{ds} \quad (38)$$

A velocidade angular (ω') em torno do eixo vertical do referencial do veículo (w) é:

$$\omega'_w = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \kappa \cdot v = \frac{v \cdot \tan^2 \delta}{C \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{4} \cdot \tan^2 \delta}} \quad (39)$$

Esta velocidade angular referida ao veículo (ω') é transformada para o referencial do mundo utilizando a matriz de orientação do veículo ($\mathbf{R}$), dada pela equação (134) no apêndice A.

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z] = \boldsymbol{\omega}' \times \mathbf{R} = [0 \quad 0 \quad \omega'_w] \times \mathbf{R} \quad (40)$$

Ou, utilizando a definição da matriz de orientação $\mathbf{R}$ dada pela equação (134):

$$\begin{cases} \omega_x = \omega'_w \cdot (\sin \psi \cdot \cos \theta + \cos \psi \cdot \sin \gamma \cdot \sin \theta) \\ \omega_y = \omega'_w \cdot (\sin \psi \cdot \sin \theta - \cos \psi \cdot \sin \gamma \cdot \cos \theta) \\ \omega_z = \omega'_w \cdot (\cos \psi \cdot \cos \gamma) \end{cases} \quad (41)$$

O ângulo de orientação azimutal (θ) é actualizado pela integração temporal da velocidade angular em torno do eixo vertical (ω_z):

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \int_t^{t+\Delta t} \omega_z \cdot dt \quad (42)$$

Da mesma forma, os ângulos de inclinação frontal e lateral são também actualizados pela integração das componentes da velocidade angular segundo, respectivamente, os eixos x e y:

$$\gamma(t + \Delta t) = \gamma(t) + \int_t^{t+\Delta t} \omega_x \cdot dt \quad (43)$$

$$\psi(t + \Delta t) = \psi(t) + \int_t^{t+\Delta t} \omega_y \cdot dt \quad (44)$$

Estes novos ângulos de inclinação frontal e lateral são depois novamente actualizados em função da geometria do terreno, como será apresentado na secção 4.9.

A relação entre o ângulo de viragem das rodas (δ) utilizado na equação (39) e o ângulo do volante pode ser definida utilizando uma aplicação interactiva com interface gráfico, desenvolvida especialmente para o efeito, e cuja janela principal se apresenta na figura 85.

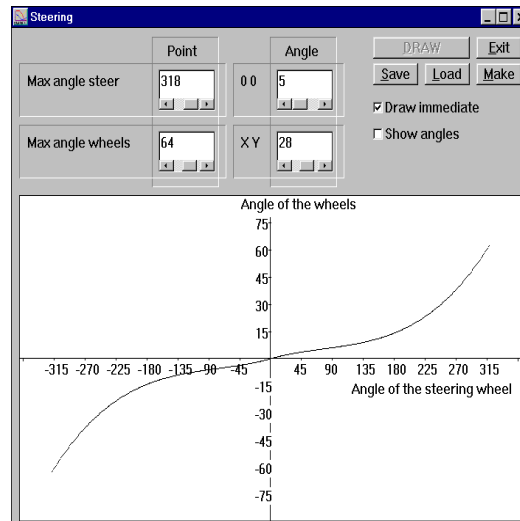


Figura 85. Editor de curvas de resposta da direcção

Este editor foi desenvolvido como uma aplicação Win95 e permite editar, gravar, recuperar e visualizar graficamente a curva de resposta do volante [Vandamme96]. Esta curva é depois importada pelo modelo do veículo do simulador.

4.7.2.2 Integração

Conhecido o valor da velocidade longitudinal (v), determinado a partir das equações (26) e (28), cabe agora ao modelo cinemático actualizar a posição do veículo, tendo em conta a orientação deste, e efectuar as alterações de direcção impostas pela actuação do volante.

O modelo cinemático pode ser descrito em dois blocos independentes. O bloco da direcção utiliza o ângulo de rotação que é imposto ao volante para determinar a taxa de curvatura com que o veículo deve ser afectado. Em seguida o bloco de integração realiza a integração numérica da velocidade e da curvatura para determinar a posição e a orientação do veículo.

A actualização da posição do veículo resulta da adição de um vector de deslocamento ($\Delta \mathbf{s}$) à posição anteriormente conhecida para o mesmo veículo ($\mathbf{s}(t)$).

$$\mathbf{s}(t + \Delta t) = \mathbf{s}(t) + \Delta \mathbf{s} \quad (45)$$

Para obter o deslocamento do veículo no intervalo de tempo (Δt) é necessário integrar numericamente a velocidade ao longo do percurso definido pela sua orientação.

$$\Delta \mathbf{s} = \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{v} \cdot dt \quad (46)$$

onde $\mathbf{v}$ é o vector de velocidade do centro do veículo. Uma vez que, como foi já referido, se assume que não existe deslizamento lateral das rodas do veículo, o vector de velocidade ($\mathbf{v}$) pode ser definido como tendo módulo igual à velocidade longitudinal (v) determinada pelas equações (26) e (28) e direcção dada pela orientação do veículo ($\mathbf{R}$).

$$\mathbf{v} = [0 \quad v \quad 0] \times \mathbf{R} \quad (47)$$

ou, utilizando a definição da matriz de orientação ($\mathbf{R}$) dada pela equação (134), no apêndice A:

$$\mathbf{v} = [-v \cdot \sin \theta \cdot \cos \gamma, \quad v \cdot \cos \theta \cdot \cos \gamma, \quad v \cdot \sin \gamma] \quad (48)$$

aplicando este vector velocidade à definição do percurso dada pela equação (46), obtemos o vector de deslocamento correspondente ao período $[t, t+\Delta t]$:

$$\Delta \mathbf{s} = \begin{bmatrix} \int_t^{t+\Delta t} -v \cdot \sin \theta \cdot \cos \gamma \cdot dt \\ \int_t^{t+\Delta t} v \cdot \cos \theta \cdot \cos \gamma \cdot dt \\ \int_t^{t+\Delta t} v \cdot \sin \gamma \cdot dt \end{bmatrix}^T \quad (49)$$

Em sistemas de tempo real, a resolução numérica de expressões integrais realiza-se normalmente pelo método de integração rectangular. Assumindo que o intervalo de integração (Δt) é suficientemente pequeno para que os valores da velocidade e dos ângulos de orientação se mantenham aproximadamente constantes, o percurso efectuado no mesmo período pode ser obtido pela expressão simplificada:

$$\Delta \mathbf{s} = [-v \cdot \sin \theta \cdot \cos \gamma \cdot \Delta t, \quad v \cdot \cos \theta \cdot \cos \gamma \cdot \Delta t, \quad v \cdot \sin \gamma \cdot \Delta t] \quad (50)$$

Da mesma forma, os ângulos de orientação são também actualizados por integração rectangular das expressões (42), (43) e (44), assumindo que o vector de velocidade angular ($\boldsymbol{\omega}$), dado pela equação (40), se mantém aproximadamente constante durante todo o período de integração Δt :

$$[\theta(t + \Delta t) \quad \gamma(t + \Delta t) \quad \psi(t + \Delta t)] = [\theta(t) \quad \gamma(t) \quad \psi(t)] + \Delta t \cdot \boldsymbol{\omega} \quad (51)$$

A integração numérica da velocidade em tempo real pode ser considerada delicada, uma vez que o ângulo de orientação azimutal pode variar mais do que o desejado durante o período de integração considerado, prejudicando a aproximação introduzida pela expressão (50). Para facilitar o processo de integração numérica podem então resolver-se analiticamente os integrais da equação (49). Nesta resolução analítica admite-se que os ângulos de inclinação frontal e lateral possam ser considerados como constantes, quando necessário. Esta aproximação é razoável, já que a condução de automóveis decorre quase sempre em terrenos aproximadamente horizontais, pelo que a taxa de variação do ângulo de orientação azimutal (ω_z) é muito superior às taxas de variação dos ângulos de inclinação. O percurso passa então a ser determinado pela equação:

$$\Delta \mathbf{s} = v \cdot \begin{bmatrix} \frac{\cos \gamma}{\omega_z} \cdot (\cos \theta(t) - \cos \theta(t + \Delta t)) \\ \frac{\cos \gamma}{\omega_z} \cdot (\sin \theta(t + \Delta t) - \sin \theta(t)) \\ \cos \gamma(t) - \cos \gamma(t + \Delta t) \end{bmatrix}^T \quad (52)$$

4.8 Seguimento do terreno

Para permitir a simulação das oscilações e inclinações típicas de um veículo quando se desloca sobre uma superfície não uniforme, é necessário monitorizar continuamente o terreno. No entanto, a determinação correcta das oscilações e inclinações exigiria uma simulação dinâmica dos elementos mecânicos das suspensões do veículo. Uma vez que este tipo de simulação dinâmica não pôde ainda ser considerado, devido ao custo elevado em termos de processamento, optou-se por uma determinação das inclinações com técnicas puramente geométricas.

O módulo de simulação dinâmica longitudinal provoca um movimento do veículo no plano definido pelos pontos de contacto das rodas. Devido às irregularidades do terreno, as posições determinadas para cada roda do veículo em cada ciclo de visualização podem corresponder a localizações acima ou abaixo do nível do terreno. Assim, antes do início de cada processo de síntese de imagem, é necessário “apalpar” o terreno e corrigir a posição vertical e a inclinação do veículo em conformidade.

A metodologia seguida utiliza as funcionalidades de determinação de colisões disponibilizadas pelo *Performer*. O terreno sob o veículo é pesquisado através de 4 vectores gravíticos ($\mathbf{z}_{fe}$, $\mathbf{z}_{fd}$, $\mathbf{z}_{te}$, $\mathbf{z}_{td}$) localizados nos centros de cada uma das rodas do veículo conforme se ilustra na figura 86. Os vectores, definidos em estruturas *Performer* do tipo *pfSeg*, são agrupados num conjunto *pfSegSet* que é depois utilizado na chamada ao método *isect* do nó que define o terreno. A boa eficiência da determinação destas colisões está portanto dependente da qualidade da modelação. Para além dos requisitos impostos em

função da visualização, o nó de terreno deve ser correctamente hierarquizado e representado de forma independente.

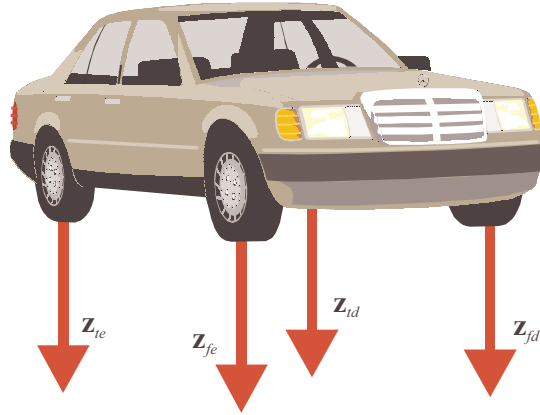


Figura 86. Pesquisa do terreno por 4 vectores gravíticos

As posições das rodas do veículo relativamente ao seu centro são $(\mathbf{r}'_{fe}, \mathbf{r}'_{fd}, \mathbf{r}'_{te}, \mathbf{r}'_{td})$, dadas pela equação (53):

$$\begin{cases} \mathbf{r}'_{fe} = [-L/2 & C/2 & 0] \\ \mathbf{r}'_{fd} = [L/2 & C/2 & 0] \\ \mathbf{r}'_{te} = [-L/2 & -C/2 & 0] \\ \mathbf{r}'_{td} = [L/2 & -C/2 & 0] \end{cases} \quad (53)$$

Utilizando a ferramenta de transformação *xformPt*, disponibilizada pelo *Performer*, os vectores de posição relativa das rodas $(\mathbf{r}'_{fe}, \mathbf{r}'_{fd}, \mathbf{r}'_{te}, \mathbf{r}'_{td})$ são transformados em função da matriz de orientação do veículo ($\mathbf{R}$) definida pela equação (134) no apêndice A.

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{fe} = \mathbf{r}'_{fe} \times \mathbf{R} \\ \mathbf{r}_{fd} = \mathbf{r}'_{fd} \times \mathbf{R} \\ \mathbf{r}_{te} = \mathbf{r}'_{te} \times \mathbf{R} \\ \mathbf{r}_{td} = \mathbf{r}'_{td} \times \mathbf{R} \end{cases} \quad (54)$$

Com estes vectores transformados e conhecendo a posição absoluta do centro do veículo é fácil determinar as posições centrais das zonas de possível contacto de cada uma das rodas com o solo.

Os vectores gravíticos são definidos como vectores verticais, orientados para baixo, com comprimento de *Len_Z* metros e aplicados *Base_Z* metros acima do ponto de contacto de cada uma das rodas com o solo.

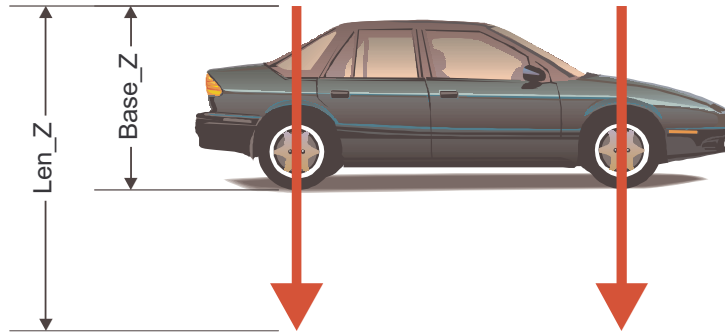


Figura 87. Definição dos vectores gravíticos utilizados na pesquisa do terreno

A intercepção destes vectores gravíticos com o terreno resulta na definição dos quatro pontos de contacto das rodas com o solo ($\mathbf{q}_{fe}$, $\mathbf{q}_{fd}$, $\mathbf{q}_{le}$, $\mathbf{q}_{ld}$).

Assumindo que o peso do veículo se encontra distribuído pela quatro rodas de forma uniforme e que os elementos elásticos associados a cada suspensão são idênticos, as inclinações lateral e frontal do veículo podem ser determinadas através das elevações dos pontos médios ($\mathbf{sf}$, $\mathbf{st}$, $\mathbf{se}$, $\mathbf{sd}$) entre os pontos de contacto no solo obtidos, conforme se indica na equação (55).

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{sf} = [sf_x \quad sf_y \quad sf_z] = \frac{\mathbf{q}_{fe} + \mathbf{q}_{fd}}{2} \\ \mathbf{st} = [st_x \quad st_y \quad st_z] = \frac{\mathbf{q}_{le} + \mathbf{q}_{ld}}{2} \\ \mathbf{se} = [se_x \quad se_y \quad se_z] = \frac{\mathbf{q}_{fe} + \mathbf{q}_{le}}{2} \\ \mathbf{sd} = [sd_x \quad sd_y \quad sd_z] = \frac{\mathbf{q}_{fd} + \mathbf{q}_{ld}}{2} \end{array} \right. \quad (55)$$

Os ângulos de inclinação frontal (γ) e lateral (ψ) são depois obtidos a partir das diferenças das coordenadas de elevação (componentes em z) dos pontos médios obtidos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \arctan \frac{sf_z - st_z}{C} \\ \psi = \arctan \frac{se_z - sd_z}{L} \end{array} \right. \quad (56)$$

De facto, por razões de eficiência, apenas as coordenadas de elevação são calculadas para os pontos médios definidos na equação (55). Para além disso, o cálculo dos ângulos de inclinação é implementado através da função acelerada *pfArcTan2* disponibilizada pelo *Performer*, que permite obter os resultados de forma rápida e sem necessidade de efectuar as divisões indicadas na equação (56).

4.9 Síntese de imagem

A imagem da simulação é apresentada num ecrã por um projector Barco Data 801S e sintetizada na estação gráfica (*Onyx*), tirando partido da pipeline gráfica *RealityEngine2* com 12 *Geometry Engines* e 1 *Raster Manager* (RM) com 4 MBytes de memória de texturas disponível nesta estação gráfica [Akeley93].

De uma forma simplificada, pode ser considerado que um aumento de complexidade dos modelos geométricos utilizados na simulação requer um aumento de *Geometry Engines* que, na configuração actual da máquina, só pode ser realizado pela colocação de outra pipeline. Por sua vez o aumento do campo visual ou da resolução da imagem apresentada está dependente de um aumento do número de *Raster Managers*.

Com a configuração actual é possível processar cenas simples, de média dimensão, a 25 imagens por segundo, num ecrã de 1280x768, sem *oversampling*².

O subsistema de síntese de imagem utiliza ainda um *Multi Channel Option* (MCO) que permite dividir a capacidade existente de síntese de imagem por diversos ecrãs. É assim possível, actualmente, utilizar qualquer uma das configurações de ecrãs indicadas na tabela 4.

Tabela 4. Configurações de visualização possíveis

1 Ecrã a 1280x1024 4 Ecrãs a 640x480	Sem <i>oversampling</i>
1 Ecrã a 800x600	com 4x <i>oversampling</i>

4.9.1 Alargamento do campo visual

Está neste momento em curso a actualização da estação gráfica *Onyx*, tendo em vista o aumento da capacidade gráfica pela incorporação de um *Raster Manager* adicional com 16 MBytes de memória de texturas. A figura 88 apresenta a estrutura da pipeline gráfica que ficará disponível, alimentada pelos 4 processadores Mips R4400 existentes.

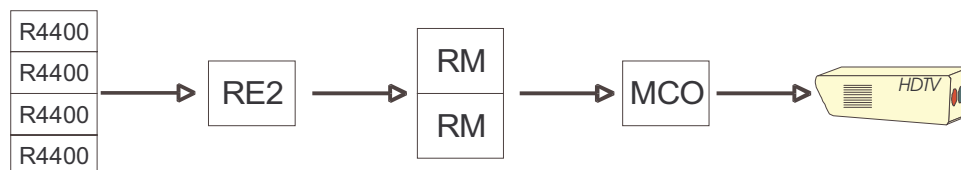


Figura 88. Pipeline gráfica obtida pela adição de um *Raster Manager* adicional.

² A técnica de *oversampling* consiste na síntese de imagens com resolução superior à pretendida, permitindo assim um aumento da qualidade das mesmas, graças à redução do *aliasing*.

A pipeline gráfica assim melhorada permitirá alargar o campo visual pela posterior adição de mais pares de projector e ecrã. Passarão a estar disponíveis as configurações de ecrãs apresentadas na tabela 5.

Tabela 5. Configurações de visualização possíveis com 2 *Raster Managers*

2 Ecrãs a 1280x1024 3 Ecrãs a 960x680 2 Ecrãs a 640x480 mais 1 a 1280x1024 6 Ecrãs a 640x480	Sem oversampling
1 Ecrã a 1280x1024 4 Ecrãs a 640x480	com 4x oversampling
4 Ecrãs a 640x480	com 8x oversampling
2 Ecrãs a 640x480	com 16x oversampling

Para além destas configurações, será ainda possível continuar a utilizar as configurações actualmente disponíveis e apresentadas na tabela 4, mas agora com a vantagem de permitir a utilização de 16 MBytes de texturas.

Fica ainda prevista a possibilidade de expansão futura da capacidade gráfica pela passagem para 4 *Raster Managers* com 16 MBytes de memória de texturas. A figura 89 apresenta a estrutura da pipeline gráfica que ficaria disponível pela concretização deste melhoramento.

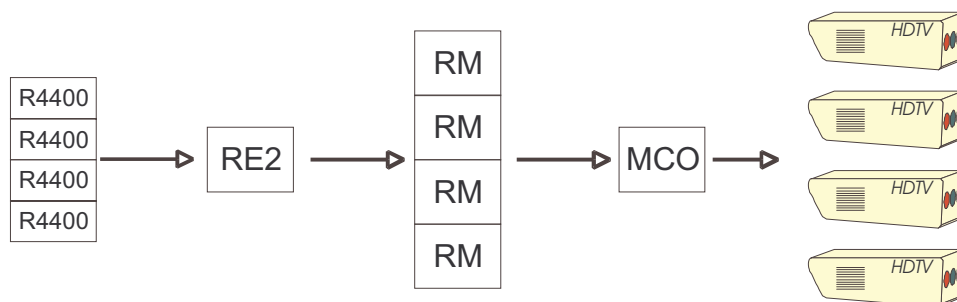


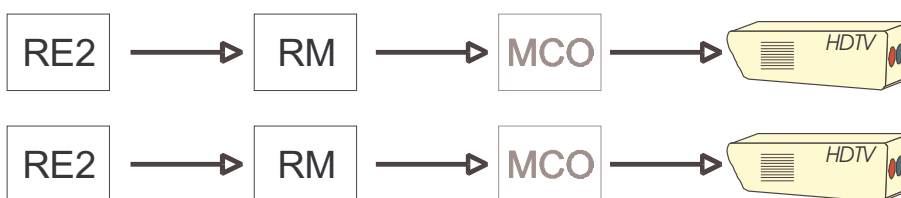
Figura 89. Pipeline gráfica obtida pela adição de 3 *Raster Managers* adicionais.

Utilizando em simultâneo os 4 *Raster Managers* será possível gerar imagens de maior qualidade, graças ao *antialiasing* conseguido pela aplicação de *oversampling*, ou gerar imagens de maior resolução, potenciando assim o alargamento do campo visual. Ficarão disponíveis as configurações de ecrãs apresentadas na tabela 6:

Tabela 6. Configurações de visualização possíveis com 4 *Raster Managers*

2 Ecrãs a 1280x1024 3 Ecrãs a 1025x768 2 Ecrãs a 640x480 mais 1 a 1280x1024 6 Ecrãs a 640x480	Sem oversampling
2 Ecrãs a 1280x1024 2 Ecrãs a 640x480 mais 1 a 1280x1024 3 Ecrãs a 960x680 6 Ecrãs a 640x480	com 4x oversampling
2 Ecrãs a 1280x1024 2 Ecrãs a 640x480 mais 1 a 1280x1024 3 Ecrãs a 960x680 6 Ecrãs a 640x480	com 8x oversampling
1 Ecrãs a 1280x1024 4 Ecrãs a 640x480	com 16x oversampling

Alternativamente, poderá no futuro ser equacionada a hipótese de actualização pela aquisição de uma pipeline gráfica adicional (RE2) para aumentar a capacidade de síntese de imagem.

**Figura 90.** Configuração obtida pela adição de uma pipeline gráfica adicional.

Será possível utilizar as configurações de ecrãs apresentadas na tabela 7, que correspondem à duplicação dos ecrãs da tabela 4.

Tabela 7. Configurações de visualização possíveis com 2 pipelines

2 Ecrãs a 1280x1024 4 Ecrãs a 640x480 + 1 a 1280x768	Sem oversampling
2 Ecrãs a 800x600	com 4x oversampling

4.9.2 Utilização de um HMD

O sistema actual permite também a utilização de um *Head Mounted Display* (HMD) em substituição do habitual projector. O HMD disponibilizado para o efeito foi um modelo económico i-glasses da Virtual I/O. Este modelo é baseado num par de ecrãs do tipo LCD

com as ópticas respectivas. Inclui também um par de auscultadores e um sensor de orientação (*tracker*) com 2 graus de liberdade.

Infelizmente, este HMD não é orientado para a utilização em aplicações baseadas em estações gráficas de elevado desempenho. Para a aquisição dos sinais fornecidos pelo sensor de orientação, o fabricante apenas disponibiliza *drivers* para PC, com sistema operativo MS-DOS. Por outro lado, a utilização do HMD em modo estereoscópico requer que o par de imagens seja fornecido num mesmo canal, utilizando o formato line-sequencial. O *RealityEngine 2* da *Silicon Graphics* não permite gerar directamente este formato.

Uma solução para o problema baseia-se na utilização de um PC para monitorizar a informação fornecida pelo sensor de orientação. Esta informação é depois enviada para a estação gráfica *Onyx* por rede *Ethernet*. Para o efeito foi desenvolvida a aplicação apropriada para o PC e o módulo de comunicação correspondente para a estação gráfica. O software desenvolvido para o PC implementa o processo de calibração, libertando assim a estação gráfica destas tarefas [Cunha98].

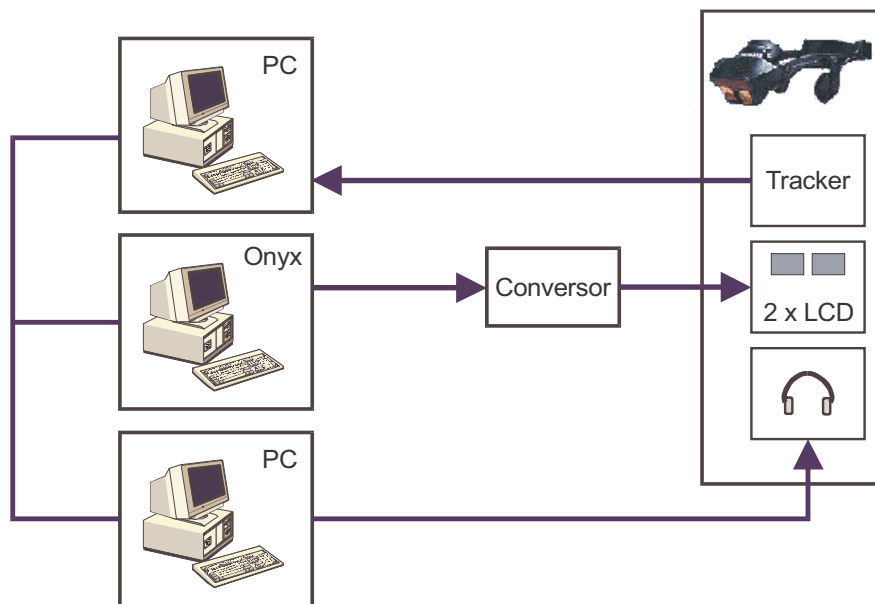


Figura 91. Esquema da ligação de um HMD, utilizando um PC para adquirir e processar a informação do sensor de orientação (*tracker*)

Para a visualização, foi desenvolvido um módulo de software que permite o envio de pares de imagens no formato requerido pelo HMD utilizado. Este módulo efectua a síntese de cada uma das imagens do par estereoscópico utilizando dois canais *Performer* independentes, configurados de acordo com a metodologia exigida em [Leitão94]. Apenas uma das imagens é gerada directamente na posição final do *framebuffer*, ficando a outra numa zona oculta do mesmo *buffer*. Imediatamente após a geração das duas imagens, e ainda antes da troca de *buffers*, as linhas pares da imagem oculta são copiadas para cima da

imagem colocada na posição final. Esta cópia é efectuada com auxílio de uma máscara que protege as linhas ímpares.

Numa abordagem mais recente, foi desenvolvido um *driver* específico que permite a leitura da informação do *tracker*, directamente na estação gráfica, através de uma porta série.

Uma descrição mais pormenorizada da interligação destes sistemas pode ser encontrada em [Cunha98].

4.9.3 Melhoramentos na selecção de objectos

O software *Performer* disponibiliza uma implementação eficiente da tradicional selecção dos objectos que se encontram dentro da pirâmide de visualização. Esta implementação utiliza uma hierarquia de esferas envolventes para eliminar os objectos que se encontram fora da pirâmide de visualização. O *Performer* prevê também a actualização automática destes volumes envolventes sempre que os descendentes respectivos se movam.

Está neste momento a ser desenvolvida uma nova estratégia de selecção de objectos visíveis que complementa, com algumas vantagens, a versão disponibilizada pelo *Performer* [Leitão99a]. Esta nossa nova estratégia permitirá uma melhor selecção de objectos pela eliminação de objectos oclusos e dos polígonos orientados de costas.

4.9.3.1 Pré-processamento de oclusão

Segundo esta nova estratégia, serão eliminados, do processo de visualização, os objectos que sejam considerados ocultos. Por razões de eficiência, será apenas testada a oclusão devida à existência de grandes polígonos oclusores, à semelhança da abordagem apresentada em [Cohen-Or98]. O processamento de determinação de objectos oclusos ocorrerá durante a fase de pré-processamento e permitirá a associação de informação de oclusão a cada objecto. Esta informação será depois utilizada para, em tempo real e de forma eficiente, seleccionar o conjunto de objectos visíveis. Os oclusores podem ser definidos dinamicamente, por pré-processamento da geometria da cena, ou manualmente, durante a fase de modelação.

A figura 92 mostra um exemplo de uma cena com dois oclusores principais (O_1 e O_2) e um objecto (Obj). Durante a fase de pré-processamento, cada zona de oclusão (Z_1 e Z_2) é determinada e associada ao objecto respectivo (Obj). A união destas zonas de oclusão define o espaço de onde o objecto não pode ser visto.

Para limitar a quantidade de memória e o processamento necessários, impuseram-se algumas simplificações:

- Os objectos são tratados só pela sua caixa envolvente e os oclusores são definidos como simples polígonos. Isto permite a especificação das zonas de oclusão como conjuntos de partes de pirâmides.
- Apenas as zonas de oclusão significativas são armazenadas. As zonas de oclusão mais pequenas são desprezadas.

- A informação de oclusão é atribuída somente a grandes objectos ou grupos.
- Apenas é considerado um pequeno número de grandes oclusores.

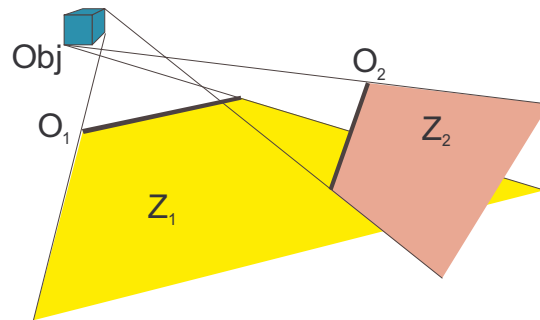


Figura 92. Zonas de oclusão

4.9.3.2 Back-facing culling

A rejeição de polígonos orientados de costas para o ponto de observação pode ser considerada uma forma particular de rejeição de polígonos oclusos, pois os polígonos apenas são visíveis de uma das faces. Esta técnica de eliminação de polígonos é de utilização muito comum nos sistemas de síntese de imagem e pode ser facilmente combinada com outros métodos de cálculos de visibilidade. Normalmente, é aplicada apenas ao nível do polígono, o que a torna de muito fácil implementação, mas não produz resultados muito impressionantes. Nos sistemas de síntese de imagem poderosos, o tempo de *rendering* de um simples polígono é tão curto que torna desinteressante a aplicação de processos de selecção a este nível.

Uma técnica de aceleração baseada na selecção hierárquica de objectos, em função da sua orientação, à semelhança da abordagem sugerida em [Kumar96], encontra-se neste momento em fase de desenvolvimento. O algoritmo em implementação realiza um teste de orientação de grupos de polígonos de forma hierárquica, eliminando do processo de síntese de imagem os conjuntos de polígonos considerados de costas para a câmara. A implementação desta técnica implica que as cenas sejam organizadas de forma a agrupar os polígonos que se encontrem próximos e que, simultaneamente, possuam direcções de visibilidade semelhantes. A organização da cena tem pois de ser efectuada num espaço multidimensional, com mais do que as três dimensões tradicionais.

Nesta nova abordagem, é mantida a organização hierárquica da cena em grupos de objectos. Cada grupo é associado como normalmente a um volume envolvente, mas agora também a um conjunto de 4 ângulos limitadores. O volume envolvente representa o espaço onde os objectos descendentes podem ser encontrados. Os quatro ângulos (θ_{min} , θ_{max} , γ_{min} e γ_{max}) representam os limites de orientação (azimute e elevação) de todos os polígonos descendentes. A figura 93 apresenta a definição dos ângulos de azimute e de elevação para uma direcção n .

O ângulo de azimute (θ) corresponde à rotação em torno do eixo vertical (z), medido no plano horizontal (x - y). Este ângulo pode tomar qualquer valor entre -180° e 180° . O ângulo de elevação (γ) é medido desde o plano horizontal e pode tomar valores entre -90° e 90° .

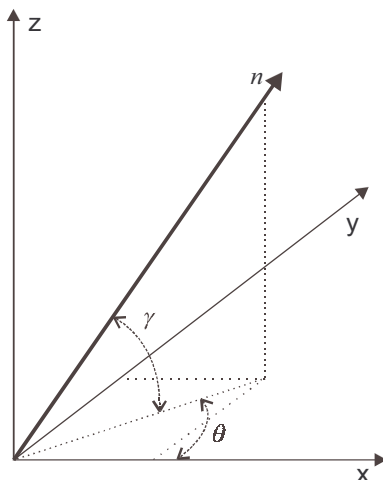


Figura 93. Ângulos de azimute e de elevação

São criados grupos utilizando os polígonos que sejam considerados próximos uns dos outros e que, simultaneamente, possuam direcções similares das normais. Este tipo de agrupamento é um trabalho pesado, uma vez que implica uma organização num espaço de 5 dimensões. No entanto, para simulações baseadas em terreno predominantemente horizontal, como é o caso da simulação de condução, o processo de agrupamento pode ser simplificado considerando apenas o ângulo de orientação medido em torno do eixo vertical. Isto permite reduzir o espaço a ordenar para apenas 4 dimensões.

Para cada novo grupo é determinada a caixa envolvente respectiva e dois intervalos angulares. A caixa envolvente corresponde como habitualmente à menor caixa de faces alinhadas com os eixos que inclui no seu interior todos os objectos originais.

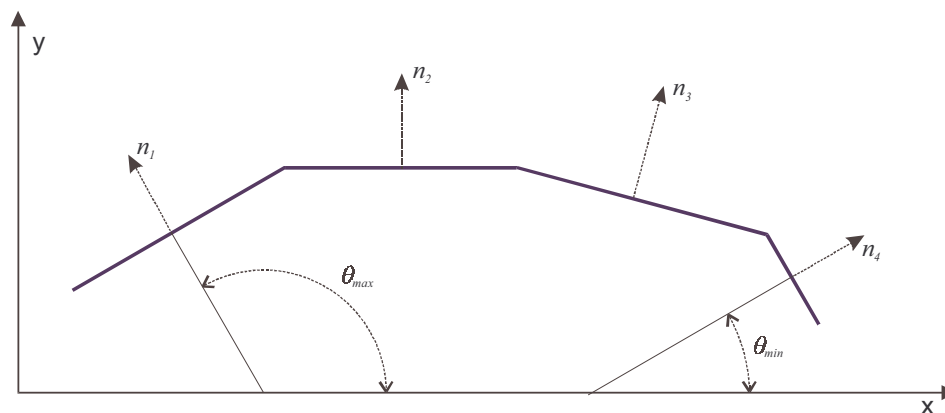


Figura 94. Definição do intervalo azimutal para um objecto composto pelos polígonos cujas normais são n_1 , n_2 , n_3 , e n_4 .

O intervalo azimutal é definido como o espaço angular compreendido entre os ângulos de azimute mínimo (θ_{min}) e máximo (θ_{max}), conforme se apresenta na figura 94 para um objecto composto pelos polígonos cujas normais são n_1 , n_2 , n_3 , e n_4 .

4.9.4 Algoritmo de selecção

Em tempo real, durante a fase de selecção dos objectos a enviar para o sistema de geração de imagem, a estrutura hierárquica da cena é percorrida da forma habitual. No entanto, graças à informação de oclusão e de orientação associada a cada objecto durante as fases de pré-processamento descritas na secção 4.9.3, é agora possível a eliminação de objectos ou de grupos de objectos que não se encontrem na zona visível, objectos que se encontrem de costas para a câmara e objectos que se encontrem tapados por um dos oclusores considerados.

Tabela 8. Decisão de visibilidade

Posição	Teste de orientação		
	Rejeitar	Rejeitar	Rejeitar
	Rejeitar	Dividir	Dividir
	Rejeitar	Dividir	Aceitar

Para cada grupo de objectos, é determinada a intersecção entre as direcções de orientação e a direcção de observação. Se o resultado desta intersecção for nulo, então todo o grupo e todos os seus descendentes podem ser eliminados do conjunto de objectos a enviar para o sub-sistema gráfico. Se todo o grupo se encontrar incluído tanto no volume de visualização como nas direcções de observação e não for considerado como ocluso, pode ser imediatamente considerado na sua totalidade para a fase seguinte. Quando apenas uma parte do grupo é encontrada dentro do volume de visualização ou incluída nas direcções de observação, é aplicado o mesmo processo de selecção a cada um dos descendentes do grupo. A tabela 8 resume a decisão tomada pelo processo de selecção dependendo dos resultados dos testes de orientação e de posição.

4.10 Síntese de som

O sistema de síntese de Som 3D foi desenvolvido como um sistema de campo aberto, ou seja um sistema em que o som é reproduzido através de colunas de som³. O número de colunas de som e a sua configuração podem ser especificados pelo utilizador. As colunas deverão ser dispostas segundo um círculo à volta do utilizador, e orientadas de forma a posicionar sobre este o seu ponto central (*sweet spot*). Existe a possibilidade de reproduzir os efeitos sonoros característicos do próprio veículo de simulação através de um dos canais do sistema. Desta forma é possível, por exemplo, o condutor sentir as vibrações do motor do seu automóvel ou o som das rodas sobre o pavimento.

O sistema de síntese de Som 3D permite a espacialização sonora simultânea de um máximo de 16 fontes sonoras com qualidade de CD. Este limite, devido às características do hardware, não diminui a qualidade do sistema. De facto, o ser humano só consegue concentrar-se numa única fonte sonora de cada vez, dentro do conjunto limitado de fontes sonoras que emitam estímulos com maior “importância”, para as quais a sua atenção possa ser desviada [Steinmetz93].

Este sistema é adequado a uma plataforma de simulação de condução, sendo toda a espacialização das fontes sonoras virtuais realizada com informação da sua base de dados, que é comunicada em tempo real à aplicação de síntese de Som 3D através de uma rede local. As fontes sonoras são modeladas com base em sons amostrados que podem ser captados por gravações dos sons originais e podem ser controladas individualmente a partir da plataforma de simulação.

Para além da espacialização das fontes sonoras, são tidos em conta diversos efeitos acústicos como o efeito Doppler, a atenuação com a distância, a absorção atmosférica e o atraso de propagação, bem como a fricção e a turbulência provocadas pelos objectos no seu deslocamento e a alteração do som gerado pelas fontes sonoras associadas a motores (por exemplo devida ao regime de rotação e binário destes).

4.10.1 Arquitectura do sistema de síntese de som 3D

O sistema de síntese de Som 3D é baseado num computador do tipo PC e comunica a estação gráfica do simulador através de uma rede *Ethernet*, tal como se pode observar na figura 95 [Coelho98].

A aplicação de síntese de Som 3D é responsável pela espacialização sonora dos objectos da simulação e geração do som. A geração de som é realizada por duas placas de som *Sound Blaster AWE32* da *Creative Labs*, fornecendo assim um total de quatro canais de som por computador, os quais são amplificados por amplificadores comerciais que alimentam cada par de colunas de som. É possível ligar sintetizadores de som adicionais às placas de som através dos seus interfaces MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*). O software deste

³ É também possível configurar o sistema de síntese de Som 3D como um sistema de campo fechado, em que o som é reproduzido por auscultadores, sendo inferior a qualidade da espacialização sonora.

módulo foi desenvolvido para sistemas operativos Windows 32 bits, tais como o Windows 95/98 ou o Windows NT.

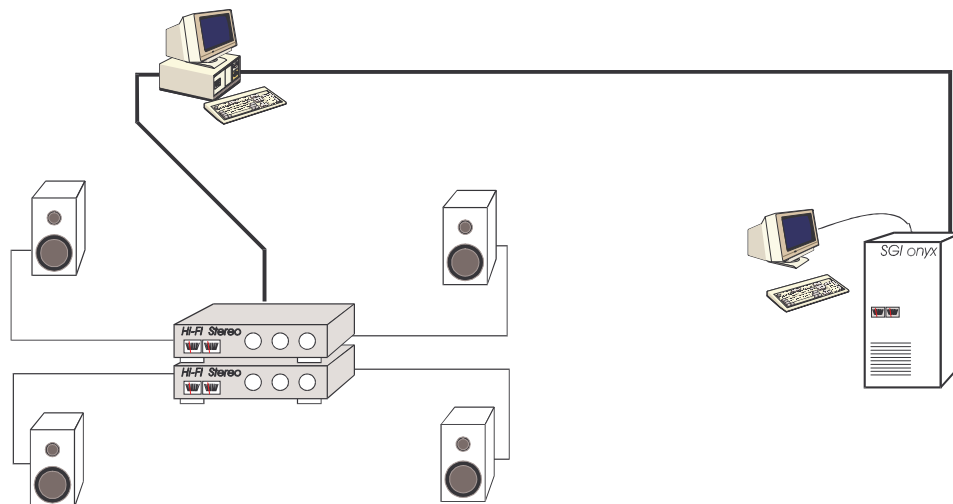


Figura 95. Arquitectura do sistema de síntese de som 3D

Dada a natureza distinta das plataformas utilizadas para a simulação e para a síntese de Som 3D, a solução adoptada para a comunicação de informação entre ambas passa pela utilização de uma rede local. O sistema de comunicação utilizado envolveu o uso de *sockets*, funcionando a plataforma de simulação de condução como servidor e a aplicação de síntese de Som 3D como cliente. Ao estabelecer a comunicação, a aplicação de síntese de Som 3D envia um pacote contendo o nome dos objectos que possuem informação sonora, ordenados por código de identificação. Esta informação serve para o simulador criar uma estrutura em cada um dos objectos designados, representando a informação sonora e a sua identificação na aplicação. Durante uma sessão de simulação e em cada ciclo de geração de imagem, o simulador envia um pacote de informação referente a cada um dos objectos que possuem informação sonora.

4.10.2 Processo de síntese de som 3D

Por síntese de Som 3D, entende-se um método computacional capaz de criar o som escutado por um espectador num determinado ambiente virtual contendo diversos objectos emitindo sons.

A ideia base consiste em tratar os sons como objectos unidimensionais (dimensão temporal) associados a objectos geométricos num mundo tridimensional. Cada som é um sinal dependente do tempo e, tal como uma textura gráfica, está localizado num determinado objecto geométrico. O processo de síntese de som tem semelhanças com o processo de síntese de imagem, dado que a natureza física do som e da luz são semelhantes.

O processo de síntese de som 3D pode ser decomposto em quatro fases distintas [Takala92], como se pode observar na figura 96. Seguidamente apresentam-se detalhes acerca da implementação de cada uma das fases referidas.

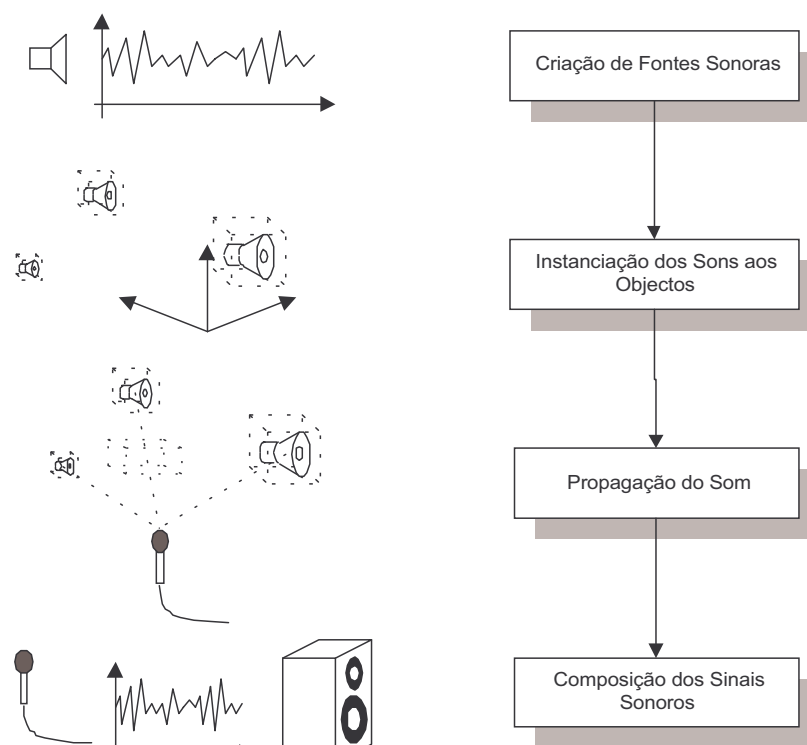


Figura 96. Processo de síntese de som 3D

4.10.2.1 Criação de fontes sonoras

Neste processo, as fontes sonoras são em geral separadas dos objectos que emitem os sons, sendo modeladas individualmente e, numa fase posterior, instanciadas aos objectos. Uma fonte sonora é tratada como uma entidade que reproduz um som monofónico variável no tempo; é considerada omnidireccional, ou seja, o seu som é escutado com a mesma intensidade a partir de qualquer direcção de “observação”.

Os sons produzidos pelos objectos são gravados e posteriormente digitalizados segundo um processo de amostragem, de forma semelhante à criação de determinadas texturas a partir da digitalização de fotografias. A amostragem de som é um dos processos mais utilizados para a síntese de som, dado que, sendo um processo semelhante à gravação, permite obter resultados de elevada qualidade sem grande carga computacional.

4.10.2.2 Instanciação dos sons aos objectos

Após a definição das fontes sonoras é necessário instanciá-las aos objectos que geram os sons respectivos. Desta forma, os sons produzidos pelas fontes sonoras instanciadas adquirem as propriedades tridimensionais dos objectos, nomeadamente a sua posição e velocidade. Como analogia ao processo gráfico podemos dizer que esta fase é semelhante à aplicação de texturas às faces dos objectos.

Para além disso, é possível modular as fontes sonoras baseando-se em outro tipo de parâmetros de simulação relativos ao objecto. Por exemplo, no caso da modelação de um automóvel, o som produzido pelo motor deve poder ser modulado dinamicamente por determinados parâmetros, tais como o regime de rotação e o binário.

4.10.2.3 Propagação do som

Nesta fase do processo de *síntese* de som, procede-se à avaliação das transformações necessárias para determinar como o som produzido pelas fontes sonoras, que agora se encontram instanciadas num espaço tridimensional, é recebido pelo observador da cena. Mais uma vez, reportando-nos a uma analogia com a síntese de imagem, esta fase é semelhante ao mapeamento de texturas dos objectos geométricos para o plano da imagem.

4.10.2.3.1 Microfone virtual

Nesta fase surge uma nova entidade que é o microfone virtual (análogo à câmara na síntese de imagem), que representa basicamente a posição e a orientação no espaço tridimensional onde é escutada a sonorização de toda a cena.

No caso de um sistema de síntese de Som 3D, existem em geral vários microfones virtuais, coincidentes com os canais do sistema de som. Assim, em sistemas de campo aberto é conveniente a utilização de um microfone por cada coluna de som.

O efeito de posicionamento dos eventos auditórios é implementado através da função de sensibilidade dos microfones. Quando um determinado evento auditório se encontra numa orientação mais próxima de um microfone do que de outro, a função de sensibilidade produz um valor superior no primeiro deles. Após experimentar outras fórmulas ([Takala92] [Inguilizian95]), obtiveram-se melhores resultados com a seguinte função harmónica esférica (figura 97),

$$S(\alpha) = \cos^k \left(\frac{\pi\alpha}{2\varphi} \right) \quad (57)$$

em que α representa o ângulo de orientação da fonte sonora em relação ao eixo principal do microfone, φ o ângulo de abertura deste, e k uma constante que permite configurar a sua direccionalidade.

A função de sensibilidade $S(\alpha)$ retorna assim valores no intervalo $[0,1]$, obtendo-se 1 para o caso de um ângulo de orientação de 0° (direcção frontal do microfone) e 0 para um ângulo igual ou superior à abertura do microfone. A abertura do microfone permite definir o ângulo máximo de captação de som. Tipicamente, este valor deverá ser escolhido com base na diferença angular entre o microfone e os microfones seguintes.

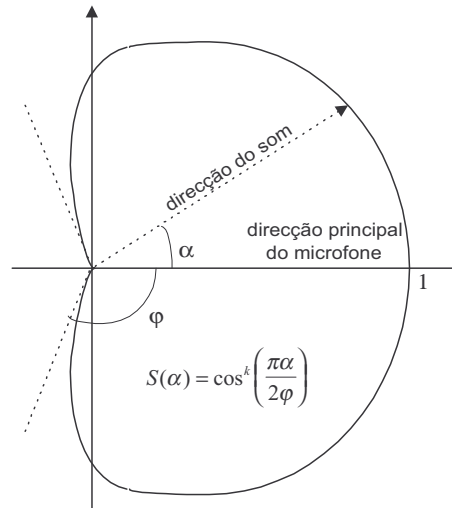


Figura 97. Função de sensibilidade de um microfone virtual

Para a síntese de som com pistas de elevação⁴ pode utilizar-se o produto de duas funções de sensibilidade (uma horizontal e outra vertical):

$$S(\alpha, \varepsilon) = \cos^{k_h} \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{2 \cdot \varphi_h} \right) \cdot \cos^{k_v} \left(\frac{\pi \cdot \varepsilon}{2 \cdot \varphi_v} \right) \quad (58)$$

em que α representa o ângulo de orientação horizontal da fonte sonora em relação ao eixo principal do microfone, ε o ângulo de elevação desta em relação ao plano horizontal do microfone, φ_h e φ_v os ângulos de abertura horizontal e vertical deste, e k_h e k_v constantes que permitem configurar a sua direccionalidade. Neste caso deve ser utilizado um número superior de colunas de som posicionadas numa esfera à volta do observador.

Para o caso de sistemas de campo fechado, nos quais são utilizados auscultadores para a reprodução do som, a configuração ideal será a de dois microfones situados na mesma posição e com orientações opostas (ou ligeiramente para a frente) e perpendiculares à direcção de orientação do observador, simulando os dois ouvidos de um ser humano. Neste caso não é possível sintetizar sons produzidos acima ou abaixo do utilizador.

4.10.2.3.2 Efeitos devidos às características geométricas

Certos efeitos acústicos são apenas dependentes das características geométricas dos objectos aos quais está instanciada a fonte sonora, pelo que, para o seu cálculo, foram deduzidas algumas expressões simples.

O efeito de dispersão origina uma atenuação de 6 dB no nível de intensidade sonora por cada duplicação da distância [Blauert83] percorrida pelo som. Na implementação, utilizou-se a seguinte aproximação:

⁴ Característica que permite ao observador determinar se um som é emitido acima ou abaixo.

$$NIS(d) = NIS_{base} - 6 \cdot \log_2 \frac{d}{d_{base}} \quad (59)$$

em que $NIS(d)$ representa o nível de intensidade sonora a uma distância d , e NIS_{base} o nível de intensidade sonora à distância base utilizada na gravação do som respectivo.

Adicionalmente, existe um outro efeito de atenuação dependente da frequência, em resultado da absorção, ao longo do trajecto, desde a fonte sonora até ao microfone. Este efeito, denominado absorção atmosférica, funciona como um filtro passa-baixo cuja frequência de corte decresce proporcionalmente com a distância entre ambos [Blauert83]. Este efeito verifica-se usualmente apenas para distâncias superiores a 15 m, e pode ser avaliado:

$$F_{corte} = F_{max} - (d - 15) \cdot \Delta f \quad (60)$$

em que F_{corte} é a frequência de corte do filtro, F_{max} a frequência de corte máxima e Δf a variação na frequência de corte por metro.

Por outro lado, devido à velocidade de propagação do som (343 m/s para o caso da atmosfera a uma temperatura de 20°C), o sinal gerado por uma fonte sonora é atrasado. Este atraso é implementado através da seguinte fórmula:

$$\tau(d) = \frac{d}{c} \quad (61)$$

em que $\tau(d)$ é o atraso a uma determinada distância (d) e c é a velocidade do som.

Quando um determinado objecto se desloca com uma velocidade diferente dos microfones, as ondas sonoras recebidas pelo microfone vão sofrer contracção ou expansão consoante a velocidade relativa. Este fenómeno designado por efeito Doppler [Park89], é implementado a partir da velocidade do objecto ao qual está instanciada a fonte sonora em relação ao microfone, pela seguinte expressão:

$$f_r = f_e \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad (62)$$

em que f_r é a frequência do sinal recebido, f_e a frequência do sinal emitido, v a velocidade relativa da fonte sonora em relação ao microfone e c a velocidade do som.

4.10.2.4 Composição dos sinais sonoros

Nesta última fase do processo de síntese de Som 3D, calculam-se as transformações finais a aplicar a cada uma das fontes sonoras e, para cada microfone, misturam-se as contribuições de todas. Este é um processo análogo ao mapeamento de texturas para o espaço imagem em que a sequência de transformações é concatenada, de forma a produzir uma única matriz de

transformação, que é então aplicada à textura. Só nesta fase e após calcular a transformação final é que o sinal sonoro associado é processado.

Uma vez que os sinais de som são aditivos, todos os sinais transformados são adicionados (misturados) para cada um dos microfones, produzindo assim o sinal da cena completa que vai ser reproduzido pela coluna de som (ou auscultador) associada.

4.10.3 Hardware de síntese de som 3D

A escolha do hardware para a geração do som recaiu sobre duas placas de som Sound Blaster AWE32 da *Creative Labs*. Estas são placas comerciais de baixo custo, mas que no entanto possuem boas capacidades ao nível de síntese de som. Adicionalmente, permitem a ligação a sintetizadores de som profissionais através do interface MIDI. O componente de *hardware* da placa utilizado neste processo é o sintetizador de som (*Advanced WavEffects 32 Music Synthesiser*). Este sintetizador (figura 98) é baseado na tecnologia de síntese por amostragem de som.

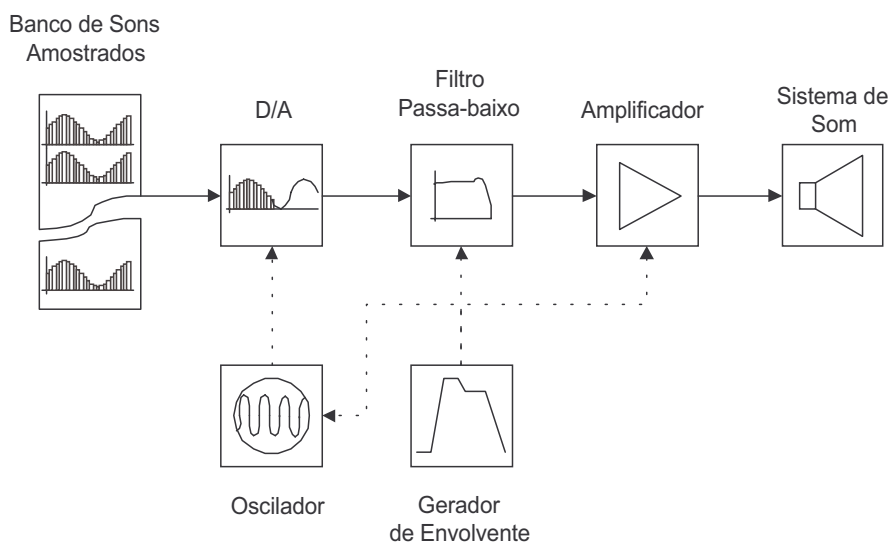


Figura 98. Hardware de síntese de som por amostragem

Durante o processo de criação das fontes sonoras, o som destas é amostrado com 16 bit a 44 kHz, produzindo som com qualidade CD. Estes sons são armazenados em 4 MBytes de memória RAM (expansível até 28 MBytes) do banco de sons amostrados da placa de som.

O oscilador controla a geração do sinal sonoro analógico, determinando a frequência a que o conversor digital-analógico opera. Alterando a frequência do oscilador, varia-se a altura⁵ do som produzido. O factor de alteração da frequência do sinal recebido é assim convertido para meios tons e posteriormente implementado através de um processo de alteração da

⁵ Por altura (*pitch*) entende-se a sensação auditiva que permite classificar um som, de grave a agudo.

frequência de reprodução do sinal amostrado, denominado roda de altura (*pitch wheel*). Actuando neste componente, consegue-se simular o efeito Doppler [Park89].

Um filtro passa-baixo permite alterar o timbre do sinal sonoro distorcendo o seu espectro. Este filtro permite uma variação da frequência de corte entre 100 Hz e 8000 Hz. Actuando na sua frequência de corte pode implementar-se o efeito de dispersão atmosférica.

O amplificador permite variar a intensidade do som actuando no seu ganho. Este componente é o responsável pelo efeito de atenuação com a distância, bem como pela implementação da função de sensibilidade do microfone (juntamente com *panning*⁶).

As características dinâmicas do sinal sonoro, ou seja, o comportamento da sua forma de onda desde o instante de geração do som até à sua extinção, podem ser modeladas através de um gerador de envolvente do tipo DAHDSR (*Delay Attack Hold Decay Sustain Release*). Actuando na característica de atraso (*Delay*), pode-se implementar o atraso de propagação.

A fase final do processo de síntese de Som 3D, ou seja, a composição do sinal sonoro, é implementada pela placa através de um misturador de 16 canais estereofónicos, permitindo assim a espacialização simultânea de 16 fontes sonoras virtuais.

4.11 Produção de relatórios

Uma das grandes vantagens da condução simulada sobre a condução real é a facilidade de monitorização dos acontecimentos, sem recurso a componentes adicionais de hardware. O simulador de condução DriS prevê a produção de relatórios completos, que podem incluir todas as variáveis envolvidas no processo de simulação do veículo conduzido interactivamente e de todos os outros veículos. Os relatórios são enviados para ficheiros de texto e apenas uma parte da informação enviada para o relatório é reproduzida no monitor da consola de supervisão em tempo real.

Devido ao enorme volume de informação que a produção de relatórios pode gerar, o preparador da experiência deve seleccionar previamente as variáveis que deseja incluir nos relatórios e a frequência de amostragem das mesmas. Na actual implementação do simulador, a especificação desta selecção, no simulador, exige a recompilação da aplicação.

4.11.1 Monitorização psico-fisiológica

Os estudos do comportamento são baseados não apenas na análise das acções provocadas pelo sujeito em teste, mas também na monitorização de algumas outras variáveis psico-fisiológicas. Para a medição de outras variáveis psico-fisiológicas usam-se tradicionalmente equipamentos altamente sofisticados, concebidos normalmente para trabalharem de forma

⁶ Por *panning* entende-se o efeito da alteração da posição de um evento auditório (posição aparente de onde parece ser proveniente um determinado som escutado) através da alteração das características dos sinais fornecidos a cada coluna de som.

completamente independente. Cada um destes equipamentos dispõe já de capacidade para apresentar um relatório de saída com a variação temporal e outra informação pertinente da variável psico-fisiológica em questão. Para a gama de experiências a que o simulador DriS foi destinado, as variáveis psico-fisiológicas que mais importava considerar são a posição retinal e o nível de actividade cerebral.

A posição retinal, que está relacionada com a direcção do olhar, é determinada a partir de um sensor óptico acoplado à cabeça do sujeito e localizado ligeiramente à frente da testa, como se apresenta na figura 99.

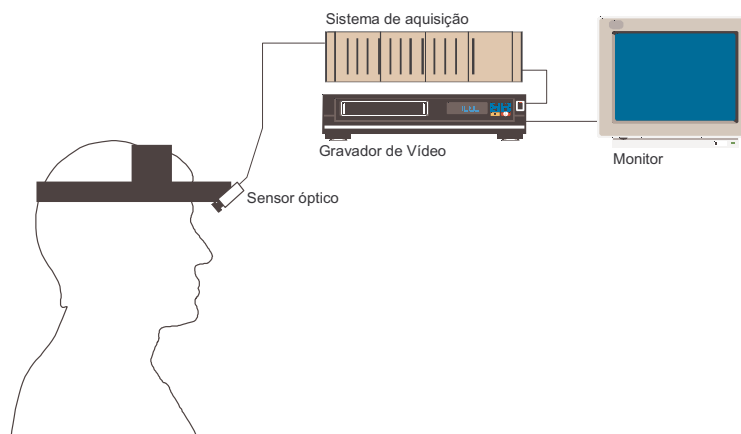


Figura 99. Dispositivo de monitorização da posição retinal

A direcção de observação é armazenada em vídeo. A análise desta variável permite determinar taxas de atenção e outros parâmetros psico-fisiológicos.

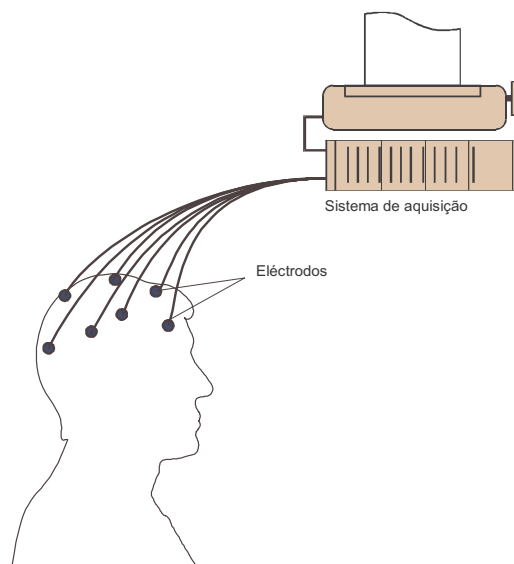


Figura 100. Dispositivo de monitorização da actividade cerebral

O nível de actividade cerebral é obtido através da aquisição de sinais electromagnéticos por um conjunto de eléctrodos colocados na cabeça do sujeito, tal como acontece nos vulgares electroencefalogramas (figura 100). A saída é produzida na forma de gráficos temporais impressos em papel.

Uma vez que estes dispositivos possuem capacidades próprias de apresentação de resultados, não se justificava a importação para o simulador das variáveis psico-fisiológicas consideradas. Optou-se então por implementar um sistema de sincronização entre o simulador e os outros dispositivos de monitorização psico-fisiológica. O sistema de sincronização consiste num pequeno circuito electrónico que é accionado pelo simulador através de uma comunicação série RS-232 e produz os sinais de sincronismo adequados aos equipamentos de monitorização utilizados, como se apresenta na figura 101.

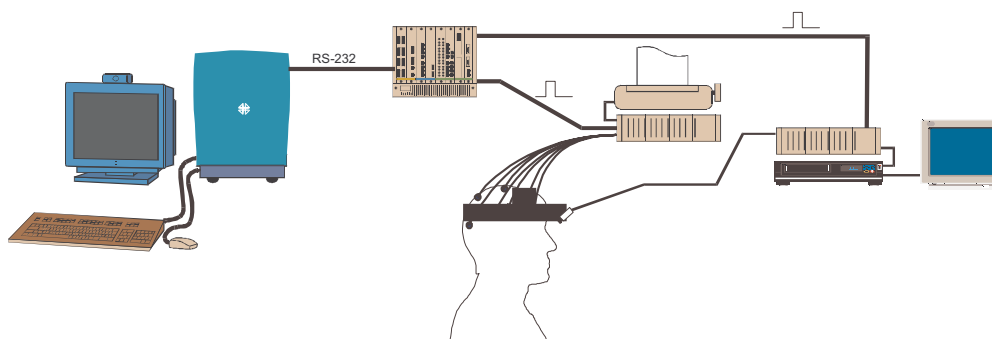


Figura 101. Sincronização dos dispositivos de monitorização psico-fisiológica

4.12 Sumário

Neste capítulo apresentou-se a arquitectura do simulador de condução DriS e a implementação dos seus blocos fundamentais.

O simulador de condução DriS integra um posto de condução simplificado de um veículo automóvel com uma estação gráfica SGI *Onyx RealityEngine2*. Esta estação gráfica mantém a base de dados de objectos da cena e efectua as tarefas de simulação física e de síntese de imagem. Comunica ainda com 2 micro computadores, sendo um destinado à síntese de som e o outro à monitorização e controlo do posto de condução.

Utiliza simulação dinâmica do movimento longitudinal do automóvel e simulação cinemática das mudanças de direcção. Este modelo do automóvel pode ser facilmente configurado através de aplicações gráficas interactivas que permitem especificar as principais variáveis físicas envolvidas.

Este simulador pode ser considerado funcionalmente equivalente aos melhores simuladores de condução científicos de base fixa existentes na Europa. A sua usabilidade foi já demonstrada pelos estudos científicos entretanto realizados e a realizar, referidos na secção 4.2.

As características mais inovadoras deste simulador de condução referem-se à implementação dos elementos autónomos de tráfego, que será apresentada de seguida, no capítulo 5.

Capítulo 5

Veículos Autónomos no DriS

Neste capítulo apresenta-se a concepção e a implementação do módulo de simulação comportamental utilizado no controlo dos veículos autónomos do simulador de condução.

Como referido na secção 3.8, a generalidade dos simuladores de condução actuais utiliza modelos distintos para a implementação do tráfego autónomo envolvente e dos veículos pré-programados. Pelo contrário, a abordagem que aqui se propõe consiste numa modelação comportamental integrada de todos os agentes autónomos utilizados. Desta forma, a implementação dos veículos autónomos que compõem o tráfego ambiente e dos veículos pré-programados é realizada pela aplicação de um único modelo comportamental. O modelo proposto permite que os veículos autónomos possam evoluir de forma completamente autónoma, possam seguir um percurso imposto por uma entidade externa superior, ou possam comportar-se de forma intermédia entre estas duas situações. Como se ilustra na figura 102, o grau de autonomia de cada veículo simulado pode assim variar de forma contínua entre a autonomia quase absoluta e a dependência total.

Como será tratado na secção 5.3, relativa ao controlo externo dos veículos virtuais autónomos, esta abordagem integrada permite ainda que os veículos sejam controlados por ordens correspondentes a diversos níveis de abstracção. Quando é fornecida uma ordem de alto nível a um veículo, ele mantém intacta toda a autonomia de nível inferior à ordem recebida, de forma a procurar atingir o seu cumprimento.

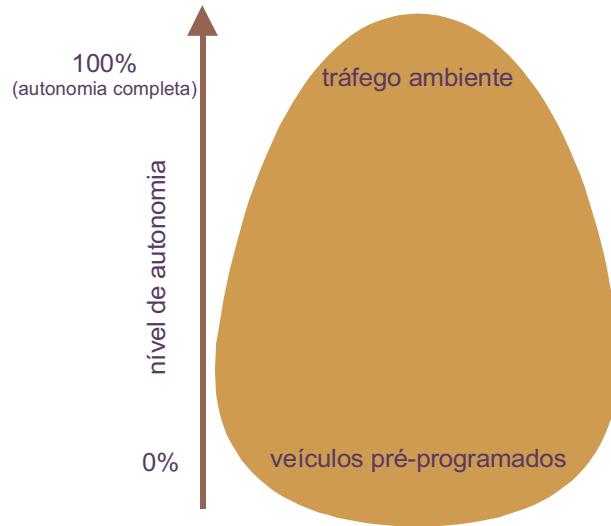


Figura 102. Abordagem integrada

5.1 Arquitectura

Os veículos autónomos virtuais desenvolvidos baseiam-se numa estrutura em camadas como a que é apresentada na figura 103 [Leitão98]. O nível inferior corresponde ao comportamento dinâmico do automóvel e a sua implementação, aplicada aos veículos autónomos, corresponde a uma versão simplificada do modelo dinâmico apresentado na secção 4.7. Este nível recebe do modelo comportamental do condutor informações que utiliza para actualizar a posição e a orientação do veículo respectivo. Este modelo comportamental foi estruturado em 3 níveis de abstracção, que correspondem aos níveis internos de decisão de um condutor, apresentados na secção 3.1.

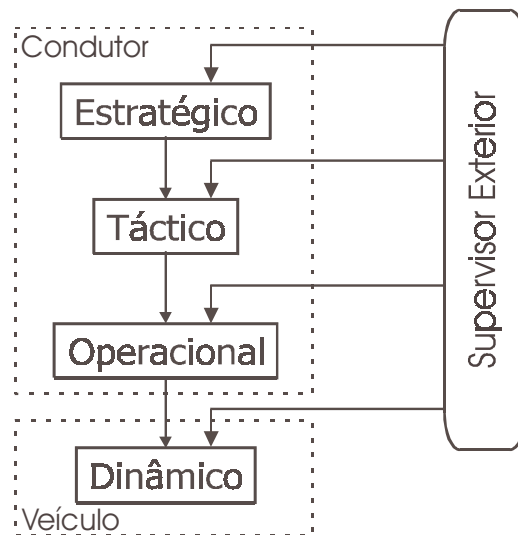


Figura 103. Modelo Comportamental de um veículo autónomo

O nível estratégico deverá tratar das decisões a médio prazo, de forma a tentar satisfazer os objectivos de longo prazo definidos superiormente. Quando ao veículo for solicitado que se desloque até um determinado local, é o nível estratégico que deverá seleccionar o percurso e comunicar periodicamente ao nível tático qual a direcção a tomar no próximo cruzamento.

O nível tático trata das decisões a curto prazo, de forma a cumprir os objectivos de médio prazo impostos pelo nível estratégico. Deverá tomar as decisões de ultrapassar ou não o veículo da frente, mudar ou não de via, etc. Estas decisões de curto prazo são comunicadas ao nível operacional.

O nível operacional toma as medidas imediatas necessárias para tentar cumprir os objectivos de curto prazo solicitados pelo nível tático. Decide, por exemplo, em que pedal actuar e como posicionar o volante.

O nível dinâmico corresponde ao comportamento do veículo automóvel. Recebe do nível operacional o estado actual dos pedais e do volante e determina a velocidade e a direcção a que o veículo se desloca no mundo virtual.

Nas subsecções seguintes apresentam-se as implementações de cada um destes três níveis. O módulo supervisor, partilhado por todos os veículos existentes num cenário de simulação, destina-se a implementar um controlo externo de cada um dos veículos. A sua implementação será apresentada na secção 5.3.

5.1.1 Nível estratégico

Ao nível estratégico, as decisões são tomadas com o objectivo de levar o veículo a um possível destino final, tentando minimizar o tempo de viagem ou outra variável relevante. Estas decisões são habitualmente tomadas, pelos condutores humanos, com base no conhecimento da rede global de estradas, nas previsões do estado do tráfego e na sinalização que possa existir.

Uma implementação do nível estratégico de um condutor virtual, capaz de produzir as decisões estratégicas típicas de condutores humanos, pode ser fundamental para algumas simulações de análise de tráfego. No entanto, em simulações microscópicas de condução automóvel, a qualidade das decisões estratégicas passa normalmente despercebida a um simples observador / condutor. Nestas simulações, a possibilidade de direccionar o tráfego com parâmetros rígidos, é normalmente mais apreciada que a “inteligência” das decisões estratégicas dos condutores autónomos.

Por estas razões, optou-se por uma implementação não inteligente do nível estratégico do condutor virtual. Nesta implementação, as decisões estratégicas são tomadas por consulta a uma tabela associada a cada veículo autónomo. Esta tabela é definida num ficheiro de texto pelo supervisor da simulação. Um exemplo possível para uma destas tabelas, supondo cruzamentos de 4 ruas, apresenta-se de seguida:

3,5:	100,0,0 ; Vira à esquerda na 3ª passagem pelo cruzamento nº 5.
4,*:	50,0,50 ; No 4º cruzamento vira à direita ou à esquerda
*,2:	0,100,0 ; Sempre que passar pelo cruzamento nº2, segue em frente
,:	0,0,100 ; Vira sempre à direita

O nível estratégico de cada condutor virtual implementado limita-se a manter contadores de passagens por cada um dos cruzamentos, mais um contador global de passagens em cruzamentos. Cada vez que um cruzamento é atingido, a tabela é consultada. Sempre que necessário, é sorteada uma nova direcção de acordo com as probabilidades especificadas.

5.1.2 Nível táctico

O nível táctico trata das decisões a curto prazo, de forma a cumprir os objectivos de médio prazo impostos pelo nível estratégico. Deverá tomar as decisões de ultrapassar ou não o veículo da frente, mudar ou não de via, etc. Estas decisões de curto prazo são comunicadas ao nível operacional.

A figura 104 apresenta um exemplo de uma decisão táctica típica. O veículo A pretende sair na próxima saída do lado direito. No entanto, para lá chegar, terá de decidir-se pela manobra de ultrapassagem ao veículo mais lento que se encontra à sua frente (B) ou, alternativamente, terá de aguardar atrás do veículo lento até chegar à saída desejada. Para seleccionar uma das opções, o condutor do veículo A tem em linha de conta parâmetros como a distância a que se encontra da saída desejada, a posição e a velocidade do veículo da frente (B), a velocidade a que desejaria ir e até a posição e a velocidade dos veículos que possam existir na via da esquerda, como o veículo C. Este tipo de opções põe-se constantemente a qualquer condutor de veículos num ambiente típico de uma via pública.

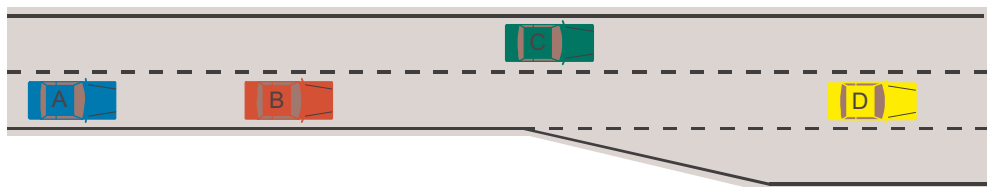


Figura 104. Decisão táctica

A implementação do nível táctico realizada utiliza um conjunto de objectos de raciocínio, organizados de forma hierárquica, como se apresenta na figura 105 [Leitão00a]. A cada um destes módulos está atribuída a monitorização de uma entidade de tráfego relevante. A partir desta monitorização e de considerações internas, cada um destes módulos possui capacidade para sugerir, desaconselhar ou vetar acções. Estes objectos são independentes uns dos outros e podem ser desenvolvidos e testados de forma autónoma.

A combinação das acções propostas pelos diversos módulos é efectuada por um módulo independente que se designa por árbitro. Este módulo baseia-se nas sugestões recebidas de cada um dos módulos tácticos para seleccionar a acção que deve ser sugerida ao nível operacional.

Ao contrário de outras abordagens que utilizam informações sobre o estado ou a tarefa que está a ser realizada para seleccionar qual o módulo que, prioritariamente, afecta a saída, o módulo árbitro implementado utiliza uma abordagem de controlo partilhado por todos os módulos tácticos. Desta forma, todos os módulos têm permanentemente uma quota parte da responsabilidade por cada acção de controlo tomada. A informação recebida de cada um dos módulos é tida em conta na determinação de qual a acção a tomar. Existem portanto múltiplas influências no processo de decisão e são feitos compromissos para satisfazer o maior número possível de objectivos. No entanto, ao contrário do que acontece com outros métodos, não são feitas médias das diversas sugestões recebidas. Em vez disso, é seleccionada a acção que maximiza uma determinada função das mesmas entradas.

Esta estruturação em módulos associados a entidades de tráfego baseia-se na arquitectura utilizada no sistema PolySapient [Sukthankar97]. A utilização de uma hierarquia de módulos, à semelhança do que acontece noutros sistemas conceptualmente diferentes [Cremer97] [Ahmad94], facilita a concepção, a afinação, a análise e as alterações ao conjunto.

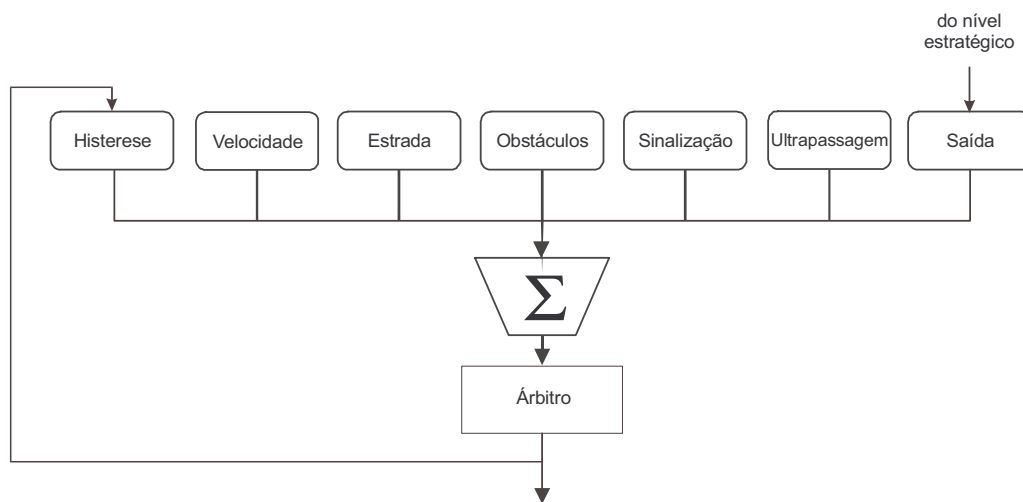


Figura 105. Estruturação do nível táctico em módulos

A comunicação entre os diversos módulos é efectuada através de funções de qualidade de acções, a descrever na secção seguinte..

5.1.2.1 Acções

Cada um dos módulos tácticos gera uma saída que é uma função de domínio bidimensional contínuo. Este domínio corresponde ao espaço de acções possíveis em termos de alteração da velocidade e da posição lateral, conforme representado na figura 106. Os limites deste espaço são os valores máximos admitidos, em função da velocidade a que o veículo segue. A opção por este espaço bidimensional contínuo em lugar do espaço discretizado utilizado em [Sukthankar97], deverá permitir otimizar, em termos de tempo de processamento e de resolução, o módulo de activação final.

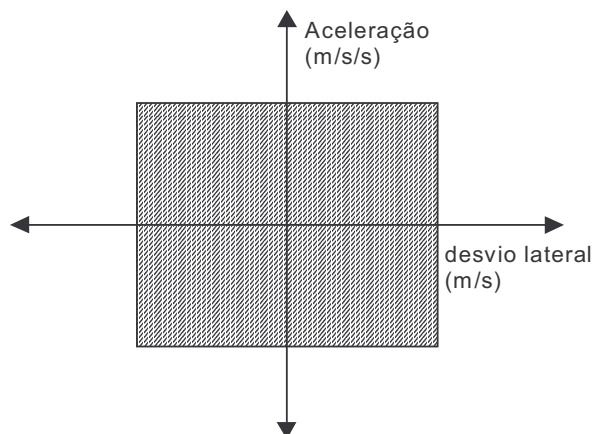


Figura 106. Espaço das acções possíveis

O valor da função em cada ponto do domínio corresponde ao grau de adequação da acção respectiva para o próximo intervalo de tempo (período táctico) considerado. Este deve ser sempre de ordem superior ao tempo entre duas avaliações tácticas consecutivas. Pelas experiências já realizadas espera-se obter resultados satisfatórios com taxas de avaliação tácticas entre 5 e 20 Hz e períodos tácticos entre 1 e 5 segundos.

A selecção do período táctico a aplicar num nível como este é uma decisão delicada, dado que vai definir o nível de decisão a que vão corresponder as saídas dos módulos tácticos. Na verdade, a modelação comportamental de um condutor em 3 níveis corresponde a uma simplificação. Sobretudo dentro do nível táctico, existem decisões que dependem de objectivos intermédios de tempos bastante diferentes.

Por exemplo: Numa via de 3 faixas como a representada na figura 107 o veículo A, a deslocar-se pela via da direita, encontra 2 veículos lentos a ocuparem as duas vias da direita. Nesta situação, o nível táctico do condutor do veículo deve decidir passar a usar a via mais da esquerda. No entanto, este deslocamento para a esquerda não pode ser efectuado de imediato, devido à presença do veículo B. Numa implementação do modelo comportamental com um maior número de níveis de decisão, o nível táctico poderia sugerir a referida mudança de via para a esquerda, deixando a um nível inferior a responsabilidade de seleccionar o melhor método de cumprir esse objectivo táctico em perfeitas condições de segurança. Neste caso, a opção ideal poderia passar por uma desaceleração para permitir que o veículo B se afaste e permita assim a mudança de via pretendida.

Esta opção corresponderia à utilização de um nível de abstracção superior que pode ser considerado próximo do método de selecção de efeito apresentado em [Rosenblatt97]. Nesta proposta, o espaço de decisão corresponde, não ao espaço lógico das acções possíveis, mas sim ao espaço dos efeitos pretendidos. A utilização de um nível de abstracção superior para a selecção da acção possui a desvantagem de obrigar a um aumento correspondente de complexidade na implementação do nível inferior (operacional), uma vez que este tem de possuir capacidade para mapear os efeitos mais distantes sugeridos em acções operacionais e garantir que estas sejam viáveis. No entanto,

oferece vantagens na implementação dos diversos módulos tácticos, uma vez que estes deixam de necessitar de considerar se os efeitos tácticos desejados são ou não atingíveis por acções concretas. Desta forma os módulos tácticos não necessitam de conhecer, por exemplo, as características físicas do veículo.

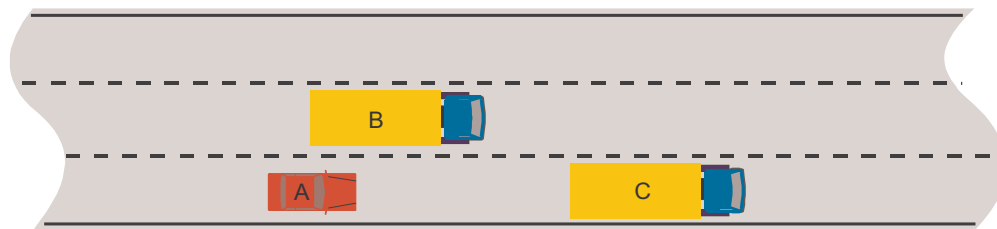


Figura 107. Importância do período táctico

Na actual implementação, optou-se por uma consideração do período táctico mais curto, de forma a facilitar a concepção e implementação do nível operacional. Desta forma, perante a situação ilustrada na figura 107, o nível táctico implementado não admite a sugestão da passagem directa para a via mais à esquerda. Dependendo da situação, pode sugerir a manutenção na via da direita ou a passagem para a via do meio em combinação com a aceleração ou a desaceleração respectiva.

5.1.2.2 Junção de comandos

Num sistema distribuído por diversos módulos como esta implementação do nível táctico, a junção dos diversos comandos sugeridos pelos diferentes módulos tem uma importância crítica. As recomendações dos diversos módulos são por vezes contraditórias. No entanto o veículo terá sempre que optar por uma e só uma acção a executar em cada instante.

Para isso, as diversas recomendações são combinadas, no módulo de junção de comandos (Σ na figura 105), através da realização de uma soma pesada das entradas para todo o domínio. Nesta soma utiliza-se um conjunto de pesos (K_i) especificados pelo preparador da experiência para cada um dos módulos tácticos de cada tipo de veículo autónomo.

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^n K_i \cdot R_i(x, y) \quad (63)$$

Para acelerar o processo de junção de comandos, a soma é abortada sempre que o valor recebido de um dos módulos tácticos corresponda a um veto. Neste caso é também atribuído o valor de veto ao resultado.

5.1.2.3 Selecção do objectivo táctico

O valor da função bidimensional recebida pelo árbitro do nível táctico, em cada ponto do domínio de decisão, representa a qualidade da acção correspondente a esse mesmo ponto do domínio. O objectivo táctico a seleccionar deverá ser a acção de maior qualidade, ou seja, o ponto do domínio onde o valor da função de qualidade atinge o seu valor máximo. A

pesquisa do valor máximo é efectuada por amostragem com subdivisão adaptativa das áreas.

A pesquisa de valor máximo é iniciada por sugestão do nível operacional, mas está também dependente da frequência de trabalho especificada para o nível tático. Desta forma, quando a sugestão do nível operacional aparece antes de cumprido o período de análise especificado, a sugestão é ignorada. Isto permite garantir que a frequência de trabalho do nível tático é sempre igual ou inferior à especificada, de forma a impedir uma alocação indesejada de recursos de processamento.

Para efectuar uma selecção de objectivo tático, o árbitro do nível tático começa por determinar, face às condições operacionais actuais, quais os limites físicos impostos ao espaço de decisão tático. Estes limites são dados pela máxima aceleração possível, a máxima desaceleração possível e o maior desvio lateral admitido.

A máxima aceleração admitida é dependente das características do motor, da velocidade actual, das condições físicas de circulação e da aceleração máxima admitida pelo condutor. A máxima desaceleração depende apenas das características do travão, uma vez que não é considerada a hipótese de escorregamento. O maior desvio lateral depende dos limites da mecânica da direcção e máxima aceleração centrípeta admitida pelo condutor.

A pesquisa do valor máximo é efectuada por amostragem bidimensional com subdivisão adaptativa das áreas. Cada um dos módulos tácticos está preparado para responder a pedidos de valor da função qualidade para um determinado ponto ou a valores de máximo da função qualidade para uma determinada área.

O espaço de decisão é sucessivamente dividido em 4 subáreas, conforme se apresenta na figura **108**. Ao módulo de junção de comandos é depois solicitado o majorante da função de activação para cada uma destas 4 subáreas. Este majorante é obtido pela soma algébrica dos valores máximos disponibilizados por cada um dos módulos tácticos antecessores. Pode portanto corresponder a um valor superior ao máximo real, já que os máximos das funções tácticas de saídas dos módulos tácticos não ocorrem normalmente para o mesmo ponto do espaço de decisão táctica.

As 4 subáreas são depois ordenadas por ordem decrescente do majorante. O mesmo processo é, em seguida, aplicado recursivamente a cada uma das subáreas pela ordem obtida. A recursão pára quando é atingida uma área inferior ao limite de amostragem. Para acelerar o processo de pesquisa, as áreas são ignoradas se possuírem um majorante inferior a um máximo já obtido numa área de dimensões mínimas.

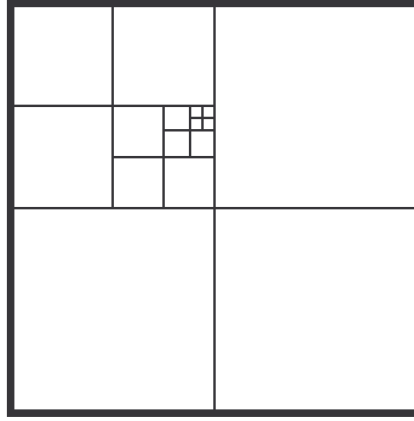


Figura 108. Pesquisa do valor máximo por divisões sucessivas

5.1.2.4 Módulo de velocidade

O módulo de velocidade tem como função a tentativa de cumprimento da velocidade objectivo, sugerida superiormente pelo nível estratégico. Para isso, vota positivamente as alterações da velocidade do veículo no sentido da aproximação da velocidade desejada.

Para além da velocidade desejada recebida do nível estratégico, este módulo utiliza apenas um parâmetro de conhecimento que é a velocidade actual do veículo. Uma vez que não utiliza informação de posição lateral, o espaço de decisão utilizado por este módulo é de facto unidimensional. A saída deste módulo é produzida com base no desvio táctico de velocidade (v_t), definido como a diferença entre a velocidade sugerida pelo nível estratégico (v_e) e a velocidade actual (v).

$$v_t = v_e - v \quad (64)$$

A saída do módulo táctico de velocidade (Q_{vel}) é uma função da variação de velocidade (y), e pode ser dada por:

$$\begin{cases} Q_{vel}(y) = k_{vel} \cdot |v_t - y| & \Leftarrow |y| \leq a_s \cdot T \\ Q_{vel}(y) = k_{vel} \cdot |v_t - y| - k_{acel} \cdot (|y| - a_s \cdot T) & \Leftarrow |y| > a_s \cdot T \end{cases} \quad (65)$$

A constante k_{vel} é um parâmetro táctico que influencia a resposta a desvios de velocidade. Pode ser manipulado de forma a alterar o comportamento do condutor. O parâmetro a_s define a máxima aceleração considerada confortável e T o período táctico considerado. As alterações de velocidade correspondentes a acelerações superiores a a_s são ligeiramente penalizadas. Normalmente, k_{acel} deverá ser superior a k_{vel} .

A figura **109** apresenta um gráfico típico da saída deste módulo. Nesta figura é possível constatar a penalização imposta às variações de velocidade (y) superiores e inferiores ao valor óptimo.

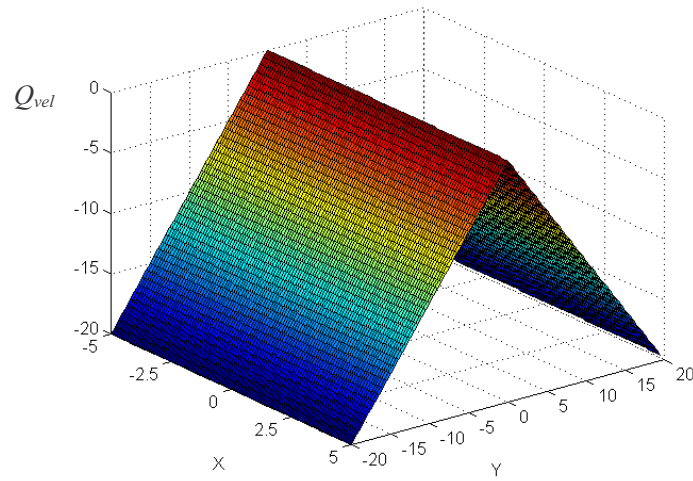


Figura 109. Saída do módulo de velocidade

5.1.2.5 Módulo da estrada

O módulo tático associado à estrada tem como objectivo a manutenção do veículo dentro da via. Para isso, penaliza fortemente ou veta as alterações de posição lateral que possam conduzir às bermas da estrada. Para disciplinar o condutor, as posições laterais coincidentes com os separadores de vias são também ligeiramente penalizadas relativamente aos centros das mesmas. Este módulo também monitoriza os separadores de vias, penalizando as alterações da posição lateral que impliquem uma mudança de via quando o separador corresponder a um risco longitudinal contínuo.

A saída produzida por este módulo (Q_{est}) é uma função da posição lateral (x):

$$Q_{est}(x) = k_{est} \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x - R_{S1}}{R_{S2} - R_{S1}}\right) \quad (66)$$

Onde R_{S1} e R_{S2} representam as posições laterais dos separadores que limitam a via onde se encontra a posição lateral x , conforme se apresenta na figura 110. A constante k_{est} é um parâmetro tático que influencia a colocação do veículo na via. Pode ser manipulado de forma a alterar o comportamento do condutor.

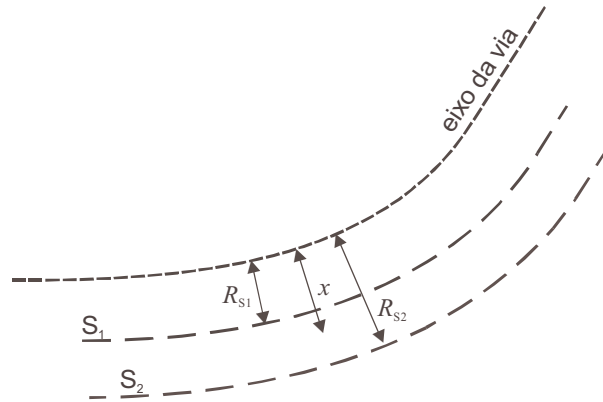


Figura 110. Definição das posições laterais utilizadas pelo módulo de estrada

A figura 111 apresenta um gráfico da função de qualidade produzida pelo módulo de estrada para uma rodovia com 4 vias. Neste gráfico é possível constatar o favorecimento das alterações da posição lateral que conduzem aos centros das vias, indicado pelos cumes da superfície apresentada.

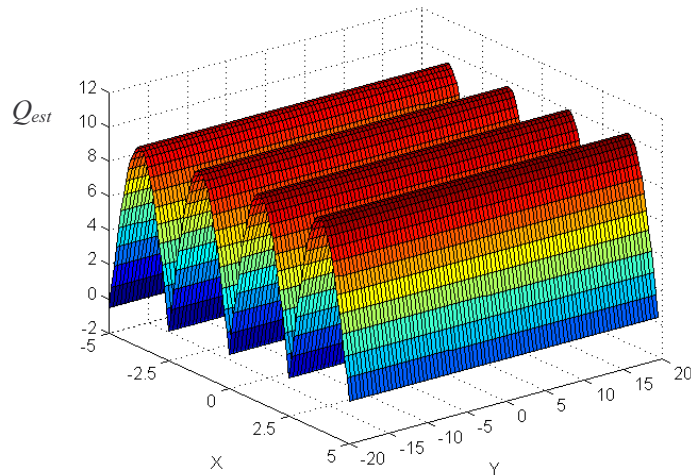


Figura 111. Saída do módulo de estrada

5.1.2.6 Módulo de saída

O módulo de Saída é o responsável pelo cumprimento da ordem estratégica de opção por uma rua ou estrada quando se aproxima um cruzamento. Para isso, favorece as alterações de posição lateral no sentido da direcção a tomar no próximo cruzamento, e propõe a diminuição da velocidade necessária para que a manobra seja realizada.

De todos os módulos táticos, o módulo de saída é o único que recebe informação do nível estratégico superior. Este módulo determina a distância para o desvio de saída proposto

pelo nível estratégico através da diferença das posições longitudinais da saída (s_s) e do veículo (s).

$$d = s_s - s \quad (67)$$

Em função do valor obtido para esta distância (d), é proposta uma aproximação para o lado onde se encontra a saída (q_{sx}) e uma eventual desaceleração (q_{sy}).

$$q_{sx}(x) = \begin{cases} 0 & \Leftarrow d \geq D_s \\ x \cdot \frac{D_s - d}{k_{sx}} & \Leftarrow d < D_s \end{cases} \quad (68)$$

$$q_{sy}(y) = \begin{cases} 0 & \Leftarrow d \geq D_s \\ (y - v_s + v) \cdot \frac{d - D_s}{k_{sy}} & \Leftarrow d < D_s \end{cases} \quad (69)$$

D_s representa a distância de activação do módulo, v_s a velocidade desejada para a realização das manobras de saída da estrada e k_{sx} e k_{sy} são parâmetros de afinação dos declives das rampas apresentadas na figura 112.

A saída deste módulo (Q_s) é depois obtida pela adição das duas propostas anteriores, e limitada entre um valor mínimo (k_{smin}) e um valor máximo (k_{smax}).

$$Q'_s(x, y) = q_{sx}(x) + q_{sy}(y) \quad (70)$$

$$Q_s(x, y) = \begin{cases} k_{smin} & \Leftarrow k_{smin} \geq Q'_s(x, y) \\ Q'_s(x, y) & \Leftarrow k_{smin} < Q'_s(x, y) < k_{smax} \\ k_{smax} & \Leftarrow k_{smax} \leq Q'_s(x, y) \end{cases} \quad (71)$$

A figura 112 apresenta um gráfico de uma situação típica da saída fornecida por este módulo. Esta situação corresponde à aproximação da saída desejada. Pode-se constatar a penalização sugerida para as acções que implicam um deslocamento lateral para a esquerda ou uma aceleração forte.

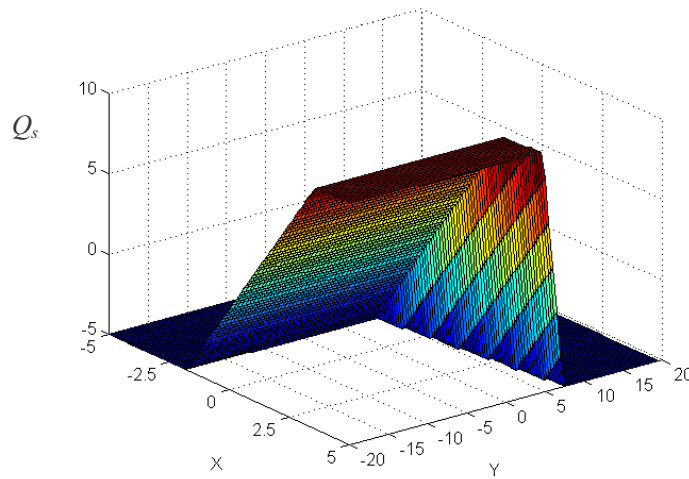


Figura 112. Função de qualidade resultante do módulo de saída

5.1.2.7 Módulo de ultrapassagem

O módulo de ultrapassagem é o responsável pela decisão de ultrapassar os veículos que possam surgir à frente.

Enquanto segue atrás de outro veículo, o módulo de ultrapassagem calcula uma função de frustração que representa a vontade de ultrapassar o veículo da frente. Quando esta função excede um limite de frustração característico do condutor, o módulo sugere o início de uma manobra de ultrapassagem pela direita ou pela esquerda.

Para valor da função de frustração ($\Phi(t)$) pode ser utilizada uma acumulação com perdas do impulso de frustração ($\phi(t)$). Este corresponde ao aumento de frustração por unidade de tempo. Logo, é tanto maior quanto menor for a velocidade do carro da frente.

$$\Phi(t) = k \cdot \Phi(t - \Delta t) + \phi(t) \cdot \Delta t \quad (72)$$

onde:

$$\phi(t) = \max(v_d - v_b, 0)$$

k - Impaciência ($0 < k < 1$)

v_b - Velocidade do carro da frente

v_d - Velocidade desejada

A figura 113 apresenta um gráfico típico da saída deste módulo. Nesta figura é possível constatar o favorecimento sugerido para o aumento de velocidade combinado com o deslocamento para a esquerda.

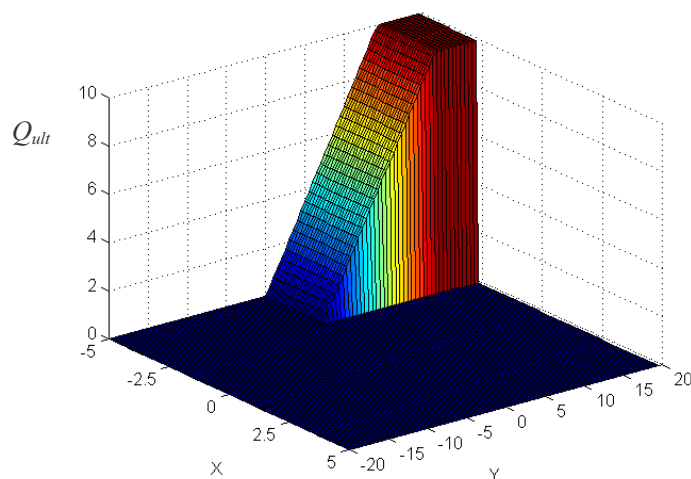


Figura 113. Exemplo da saída produzida pelo módulo de ultrapassagem

5.1.2.8 Módulo de obstáculos

Este módulo é o responsável por evitar colisões com outros objectos.

Para implementação deste módulo, optou-se por uma arquitectura modular semelhante à utilizada globalmente no nível táctico, e já apresentada anteriormente. O módulo é então composto por um conjunto de submódulos semelhantes entre si, cada um com um obstáculo associado. Cada um destes submódulos monitoriza a posição do objecto que lhe está associado, e desaconselha as alterações de velocidade e posição lateral que possam colidir com o obstáculo.

Na implementação actual, apenas foram considerados como obstáculos os outros veículos que circulam na mesma estrada e no mesmo sentido. Dada a arquitectura modular desta implementação, para considerar obstáculos de outro tipo bastará adicionar mais submódulos semelhantes.

Foram desenvolvidas duas versões do módulo de obstáculos: A primeira versão utilizava 5 submódulos, cada um responsável pela monitorização de uma zona envolvente do veículo e pela consideração de um possível veículo que lá existisse, como consta da figura seguinte.

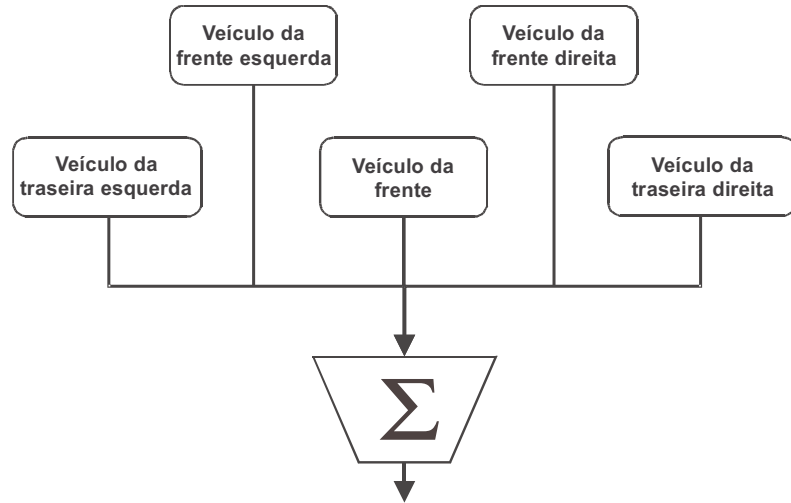


Figura 114. Módulo de obstáculos - primeira versão

O submódulo de saída (Σ na figura 114) realiza apenas a soma dos resultados recebidos dos submódulos anteriores, de acordo com a equação (73).

$$Q_{obs}(x, y) = \sum_{i=1}^5 Q_{obsi}(x, y) \quad (73)$$

As zonas monitorizadas por cada um dos submódulos são definidas pelas áreas rectangulares representadas na figura seguinte.

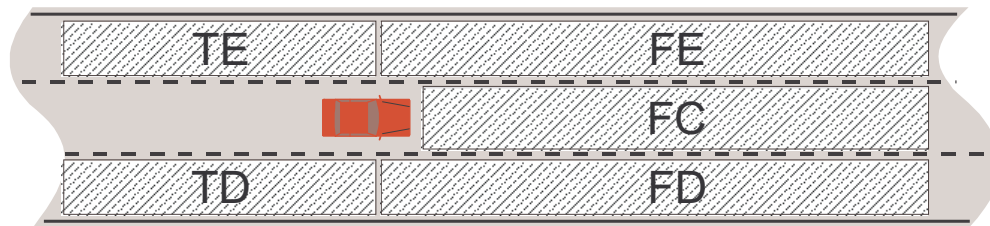


Figura 115. Áreas monitorizadas pelos submódulos de obstáculos

Desta forma, uma vez que cada região é monitorizada apenas por um submódulo e que cada submódulo apenas considera um veículo, só podiam ser considerados os 5 veículos próximos (3 à frente e 2 atrás).

Na segunda versão deste módulo, existe um conjunto de n submódulos exactamente idênticos que são associados dinamicamente e em tempo real a cada um dos veículos que se encontrarem dentro da zona de monitorização. O número de submódulos utilizado depende portanto do número de veículos encontrados, sendo limitado apenas por razões técnicas.

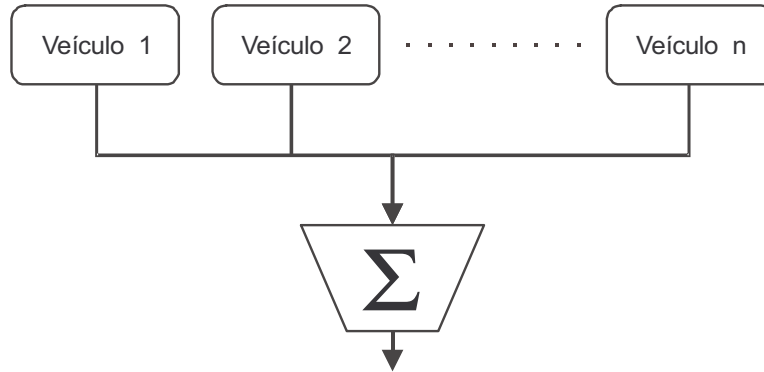


Figura 116. Módulos de obstáculos - versão actual

A zona de monitorização (ZM) é agora definida simplesmente como a área rectangular que envolve o veículo, como se apresenta na figura 117.

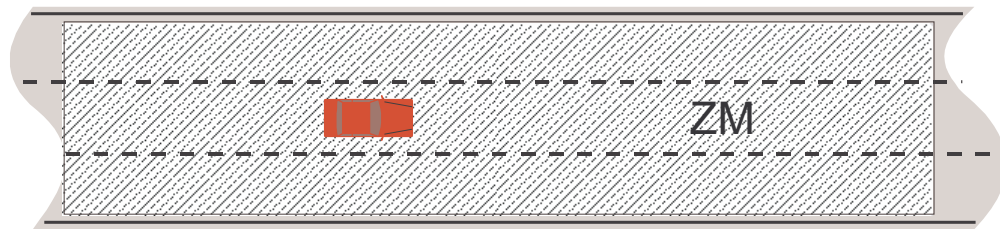


Figura 117. Zona de monitorização na versão actual

As dimensões da área de monitorização podem ser configuradas de acordo com os objectivos da simulação. Uma redução desta área permite uma diminuição do processamento requerido por este módulo, sobretudo em situações de grande densidade de tráfego.

Tal como na primeira versão, o submódulo de saída (Σ na figura 116) realiza apenas a soma dos resultados recebidos dos submódulos anteriores, como se apresenta na expressão seguinte para n obstáculos considerados:

$$Q_{obs}(x, y) = \sum_{i=1}^n Q_{vi}(x, y) \quad (74)$$

A figura 118 apresenta um gráfico típico da saída deste módulo. Nesta figura é possível constatar a forte penalização (veto) imposta a algumas combinações de aceleração e alteração da posição lateral.

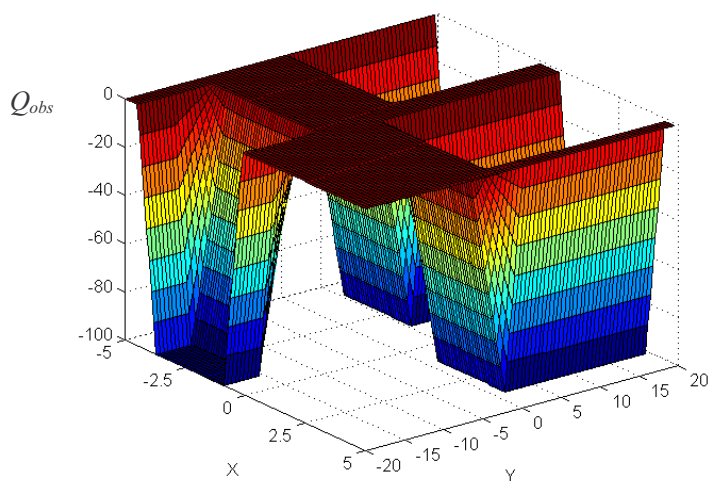


Figura 118. Saída do módulo de obstáculos

5.1.2.9 Módulo de veículo

Cada um destes módulos é associado a um dos veículos que se encontrem na zona de monitorização. O módulo fica então responsável pela monitorização da posição do objecto que lhe está associado, e por desaconselhar as alterações de velocidade e posição lateral que possam colidir com o obstáculo.

Para isso, é determinado o vector de distância entre o veículo controlado e o objecto monitorizado. As coordenadas deste vector bidimensional correspondem às posições relativas lateral (r_i) e longitudinal (s_i) do veículo monitorizado.

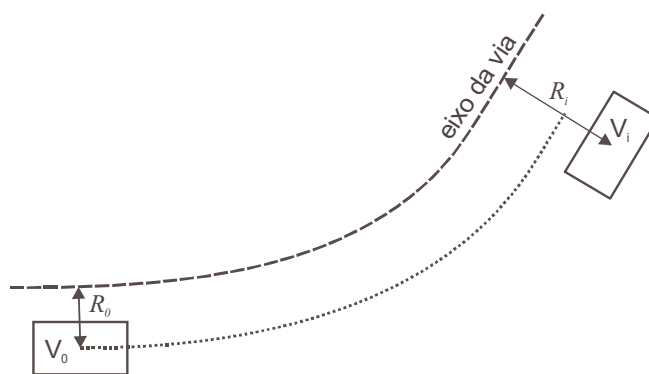


Figura 119. Posição lateral relativa

A posição lateral relativa (r_i) de um veículo (V_i), como o representado na figura 119, pode ser definida como a diferença entre a sua distância ao eixo da via (R_i) e a distância ao eixo da via do veículo controlado (R_0).

$$r_i = R_i - R_0 \quad (75)$$

A posição longitudinal relativa (s_i) do mesmo veículo pode ser definida como a distância que o veículo controlado (V_0) teria que percorrer, mantendo a sua distância ao eixo da via, para alcançar a posição longitudinal do veículo V_i , como se apresenta na figura 120.

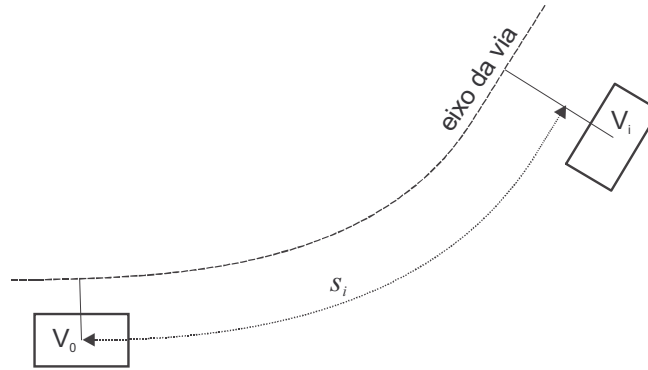


Figura 120. Posição longitudinal relativa

Utilizando o vector de distância e o valor da velocidade relativa, é especificada a função de qualidade das acções possíveis que corresponde à saída deste módulo ($Q_v(x, y)$). Esta função bidimensional é calculada pelo produto de duas funções unidimensionais que representam respectivamente as restrições laterais ($q_{lat}(x)$) e as restrições longitudinais ($q_{long}(y)$) que podem ser provocadas pela presença do obstáculo considerado, conforme se apresenta na expressão seguinte:

$$Q_v(x, y) = \frac{q_{lat}(x) \cdot q_{long}(y)}{veto} \quad (76)$$

As funções de restrição longitudinal e lateral são apresentadas nas sub-secções seguintes.

5.1.2.9.1 Função de restrição longitudinal

A função de restrição longitudinal penaliza as variações da velocidade que provoquem uma aproximação excessiva ao obstáculo. Para isso, as variações da velocidade que conduzem a uma colisão com o obstáculo considerado são vetadas. Às variações da velocidade que permitem manter a distância de segurança com o obstáculo é atribuída uma função de qualidade nula, não sendo portanto penalizadas. Às variações de velocidade entre os valores de segurança e os valores de colisão é atribuída uma qualidade que varia linearmente entre zero e o valor de veto:

$$q_{long}(y) = \begin{cases} 0 & \Leftarrow y \leq y_{seg} \vee y \geq y_{fre} \\ (y - y_{seg}) \cdot \frac{y_{max} - y_{seg}}{veto} & \Leftarrow y_{seg} < y < y_{max} \\ veto & \Leftarrow y_{max} \leq y \leq y_{min} \\ (y - y_{min}) \cdot \frac{y_{min} - y_{fre}}{veto} & \Leftarrow y_{min} < y < y_{fre} \end{cases} \quad (77)$$

Onde y_{seg} representa a máxima variação da velocidade que permite não ultrapassar a distância frontal de segurança para o obstáculo considerado, e y_{fre} representa a mínima variação da velocidade que permite manter a distância de segurança longitudinal para um veículo perseguido; y_{max} e y_{min} representam os limites do conjunto de variações de velocidade que provocam uma colisão com o obstáculo considerado.

A figura 121 apresenta o gráfico obtido para a função de restrição longitudinal ($q_{long}(y)$) para valores genéricos de y_{seg} , y_{fre} , y_{max} e y_{min} .

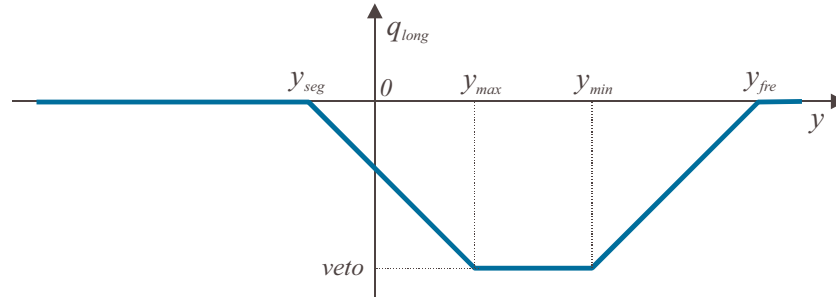


Figura 121. Função de restrição longitudinal

Para seleccionar os valores de y_{seg} , y_{fre} , y_{max} e y_{min} é necessário considerar o tipo de desaceleração que se deseja obter para o veículo autónomo. A figura 122 apresenta um gráfico onde são representadas várias alternativas de desaceleração que permitem atingir o ponto de objectivo (S) definido por uma distância de segurança para o veículo (D_s) da frente e a velocidade deste (v_f).

O eixo vertical deste gráfico representa a velocidade longitudinal de um veículo (v) e o eixo horizontal a distância respectiva para o veículo da frente (d). O ponto A representa a situação actual de um veículo autónomo, supondo uma velocidade própria (v_A) superior à do veículo que o antecede (v_f), e uma distância entre ambos (d_A) superior à margem de segurança desejada (D_s).

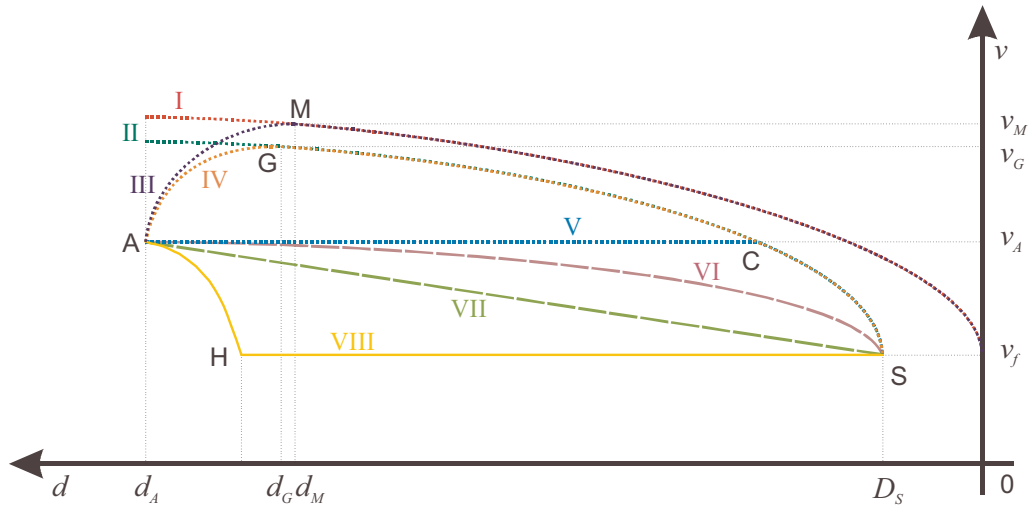


Figura 122. Gráfico velocidade-distância com opções de desaceleração

A curva I, representa o lugar geométrico dos pontos para os quais é possível a anulação da distância para o veículo da frente, através da aplicação constante da máxima desaceleração permitida (a_M). Por outras palavras, esta curva representa os pontos limites para os quais é ainda possível evitar a colisão com o veículo da frente, através da aplicação da travagem máxima admitida. Todos os pontos localizados acima desta curva correspondem a situações de colisão iminente e inevitável. Naturalmente, os pontos localizados para a direita do eixo vertical ($d < 0$) correspondem a colisões efectivas. A equação da curva I pode ser determinada a partir das equações de movimento do veículo para um valor constante da aceleração:

$$d = D_0 - (v_0 - v_f) \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (78)$$

$$v = \frac{\partial d}{\partial t} = v_0 + a \cdot t \quad (79)$$

onde D_0 e $(v_0 - v_f)$ são os valores relativos da posição e da velocidade no instante $t=0$. Para simplificar, podemos colocar a origem do referencial temporal ($t=0$) no instante em que a velocidade relativa $(v - v_f)$ se anula. Desta forma, o valor da posição relativa na origem dos tempos passa a corresponder também à posição relativa mínima (no caso da travagem) e a expressão (78) pode ser simplificada para:

$$d = D_0 - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (80)$$

Note-se que, no caso da travagem representada no gráfico da figura 122, tanto a aceleração como o tempo são negativos. Conjugando as equações (79) e (80) de forma a eliminar a variável tempo (t), obtém-se a equação de um percurso genérico efectuado com uma taxa de desaceleração constante:

$$d = D_0 - \frac{(v - v_0)^2}{2 \cdot a} \quad (81)$$

A curva limite de segurança (I) pode ser definida pela mesma equação quando a aceleração toma o valor máximo negativo admitido (a_M), a distância relativa mínima se anula e a velocidade na origem dos tempos (v_0) corresponde à velocidade do veículo da frente (v_f).

$$d = -\frac{(v - v_f)^2}{2 \cdot a_M} \quad (82)$$

A curva II, representa o lugar geométrico dos pontos para os quais é possível a transição para o ponto de objectivo final (S), através da aplicação constante da máxima desaceleração confortável (a_S). Corresponde a um percurso genérico efectuado com uma taxa de desaceleração constante, como o definido pela equação (81), mas agora com o valor mínimo da distância relativa (D_0) coincidente com a distância de segurança pretendida (D_s).

$$d = D_s - \frac{(v - v_f)^2}{2 \cdot a_S} \quad (83)$$

A curva III corresponde à situação de utilização de toda a folga existente. Numa primeira fase existe uma aceleração até que é atingida a curva limite de segurança (I), no ponto M. Nesta altura a aceleração é corrigida para o valor da máxima desaceleração permitida (a_M), e o percurso torna-se coincidente com o definido para a curva I.

Assumindo que a fase de aceleração dura um período T e que durante este período o valor da aceleração (a_T) é mantido constante, pode-se determinar o valor máximo que esta aceleração pode tomar para que não seja violado o limite de segurança representado pela curva I. A posição relativa do veículo perseguidor passaria então para (d_M):

$$d_M = d_a - (v_a - v_f) \cdot T - \frac{1}{2} \cdot a_T \cdot T^2 \quad (84)$$

Determinando a intersecção desta trajectória com a curva limite de segurança (I) definida pela equação (82), podemos determinar o valor máximo da velocidade relativa no fim do período T . Para simplificar os cálculos, é possível desprezar o efeito da aceleração imposta durante o período T na distância percorrida nessa primeira fase. Desta forma, a equação (84) pode ser simplificada, e d_M pode ser determinado, por aproximação, independentemente da aceleração:

$$d_M \cong d_a - (v_a - v_f) \cdot T \quad (85)$$

O valor máximo da velocidade admitido para o final do período T (v_M) pode então ser determinado pela resolução da equação (82) em ordem à velocidade, para $d=d_M$:

$$v_M = v_f + \sqrt{2 \cdot d_M \cdot a_M} \quad (86)$$

O valor da aceleração máxima admitida durante o período T (a_T), correspondente à primeira fase da curva III, pode assim ser facilmente obtido:

$$a_T = \frac{v_M - v_A}{T} = \frac{v_f - v_A + \sqrt{2 \cdot d_A \cdot a_M}}{T} \quad (87)$$

A curva IV corresponde à opção por efectuar uma aceleração constante (a_G), durante uma primeira fase correspondente a um período táctico (T), atingindo a curva de desaceleração confortável (II) definida pela equação (83) num ponto G. A distância entre os veículos correspondente a este ponto (d_G) pode ser aproximada por:

$$d_G \cong d_a - (v_a - v_f) \cdot T \cong d_M \quad (88)$$

O valor máximo da velocidade admitido para o final do período T (v_G) pode então ser determinado pela resolução da equação (83) em ordem à velocidade, para $d=d_G$:

$$v_G = v_f + \sqrt{2 \cdot d_G \cdot a_s} \quad (89)$$

O valor da aceleração máxima admitida durante o período T (a_G) correspondente à primeira fase da curva IV, pode assim ser facilmente obtido:

$$a_G = \frac{v_G - v_A}{T} = \frac{v_f - v_A + \sqrt{2 \cdot d_G \cdot a_s}}{T} \quad (90)$$

A curva V corresponde à situação de manutenção de uma velocidade constante até ser atingida a curva de desaceleração confortável (II). O ponto onde este limite seria atingido (C) pode ser determinado pela intersecção da curva de desaceleração confortável (II), dada pela equação (83), com a recta horizontal $v=v_A$.

$$d_C = D_s - \frac{(v_A - v_f)^2}{2 \cdot a_s} \quad (91)$$

A curva VI corresponde à utilização de uma taxa de desaceleração constante para efectuar o percurso desde o ponto actual (A) ao ponto objectivo (S). O ponto actual pode ser definido pela distância actual ao veículo da frente (d_A) e pela velocidade relativa do veículo controlado ($v_A - v_f$). O ponto objectivo pode ser definido pela distância pretendida para o veículo da frente (D_s) e pela velocidade deste (v_f). O valor da desaceleração constante (a_c) que permitiria efectuar a desaceleração desejada seria:

$$a_c = \frac{v_f^2 - v_A^2}{2 \cdot (D_s - d_A)} \quad (92)$$

A recta VII corresponde à manutenção de um valor constante da derivada da velocidade relativa em ordem ao erro de distância.

$$\frac{\partial v}{\partial d} = \frac{\partial v}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial d} = \frac{v_A - v_f}{d_A - D_S} \quad (93)$$

a aceleração instantânea (a_r) varia ao longo da recta de acordo com:

$$a_r = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{v_A - v_f}{d_A - D_S} \cdot \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{v_A - v_f}{d_A - D_S} \cdot v \quad (94)$$

A trajectória especificada pela curva VIII corresponde à utilização do tempo correspondente a um período táctico para anular rapidamente o valor da velocidade relativa. A aceleração necessária para efectuar esta correcção será (a_H):

$$a_H = \frac{v_f - v_A}{T} \quad (95)$$

Para especificação da curva de restrição longitudinal utilizam-se as trajectórias III, IV e VIII. Assim, o parâmetro y_{seg} da equação (77) corresponde à variação da velocidade longitudinal, durante um período táctico, obtida pela aplicação da aceleração (a_G) determinada pela equação (90), em função da trajectória IV. Para as situações em que os veículos se encontram próximos (distâncias inferiores a duas distâncias de segurança) é utilizada a aceleração (a_H) determinada pela equação (10), em função da trajectória VIII. O parâmetro y_{max} da equação (77) representa a variação da velocidade longitudinal, durante um período táctico, correspondente à aceleração (a_T) determinada pela equação (87), em função da trajectória III. Quando o veículo obstáculo se encontra atrás do veículo autónomo considerado, a uma distância superior a duas distâncias de segurança ($d_A < -2 \cdot D_S$), é atribuído a y_{max} um valor máximo negativo, provocando o veto de todas as desacelerações inferiores a y_{min} .

Os parâmetros y_{min} e y_{fre} são determinados pela metodologia simétrica, quando o obstáculo se encontra atrás do veículo autónomo, ou à frente, a uma distância não superior a duas distâncias de segurança.

5.1.2.9.2 Função de restrição lateral

A função de restrição lateral penaliza as variações de direcção que provoquem uma aproximação excessiva ao obstáculo. Para isso, as direcções que conduzem a uma colisão com o obstáculo considerado são vetadas. Às direcções que permitem manter a distância de segurança com o obstáculo é atribuída uma função de qualidade nula, não sendo portanto penalizadas. Às direcções entre os valores de segurança e os valores de colisão é atribuída uma qualidade que varia linearmente entre zero e o valor de veto:

$$q_{lat}(x) = \begin{cases} 0 & \Leftarrow x \leq x_{eseg} \vee x \geq x_{dseg} \\ (x - x_{seg}) \cdot \frac{x_{max} - x_{eseg}}{veto} & \Leftarrow x_{eseg} < x < x_{max} \\ veto & \Leftarrow x_{max} \leq x \leq x_{min} \\ (x - x_{min}) \cdot \frac{x_{min} - x_{dseg}}{veto} & \Leftarrow x_{min} < x < x_{dseg} \end{cases} \quad (96)$$

Onde x_{eseg} representa a direcção que permite passar, em segurança, pela esquerda do obstáculo considerado, e x_{dseg} representa a direcção que permite passar em segurança pela sua direita; x_{max} e x_{min} representam os limites do conjunto de direcções que provocam uma colisão com o obstáculo considerado.

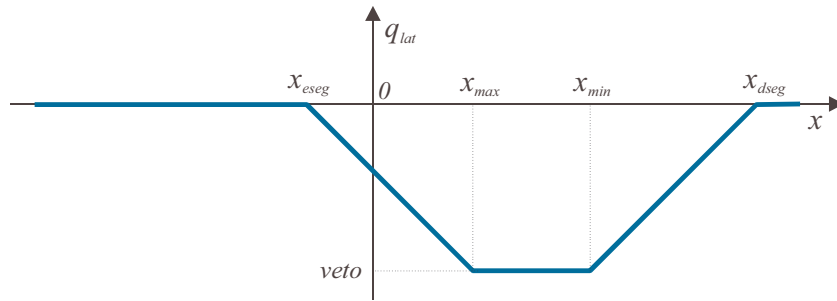


Figura 123. Função de restrição lateral

A figura 123 apresenta o gráfico obtido para a função de restrição lateral ($q_{lat}(x)$) para valores genéricos de x_{eseg} , x_{dseg} , x_{max} e x_{min} .

A figura 124 apresenta um gráfico típico da saída de um módulo de monitorização de veículo. Nesta figura é possível constatar a forte penalização (veto) imposta às variações de velocidade conjugadas com as variações de posição lateral que podem colidir com o veículo considerado.

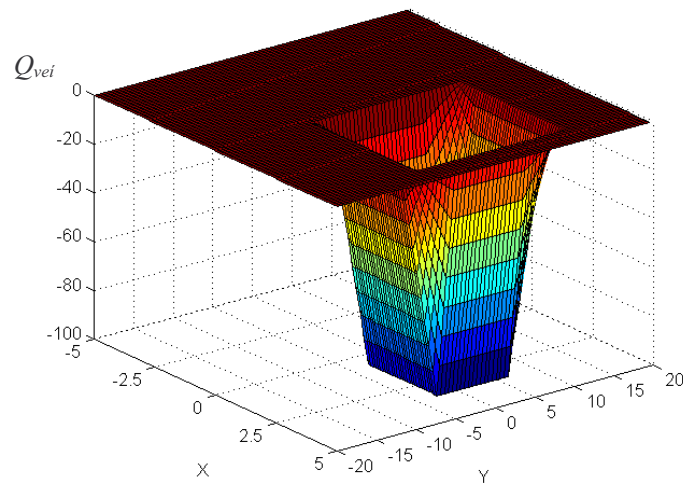


Figura 124. Saída do módulo de monitorização de um veículo

5.1.2.10 Módulo de histerese

O módulo de histerese é responsável pela manutenção da consistência entre avaliações tácticas, emulando assim a inércia comportamental do condutor.

Apesar de alguns dos módulos tácticos já descritos manterem internamente variáveis de descrição do estado, dependentes da história passada do veículo e do ambiente envolvente, não existe nesta implementação do nível táctico nenhuma noção global de estado ou plano. Em cada avaliação, é produzida uma saída, que corresponde a uma acção sugerida, utilizando praticamente apenas as entradas recebidas da monitorização do meio ambiente no mesmo instante. Este tipo de funcionamento sem utilização de memória poderia levar o sistema a exibir um comportamento aleatório, oscilando entre duas acções classificadas com valores de qualidade idênticos.

O módulo de histerese tenta evitar este comportamento aleatório através do favorecimento das acções próximas daquela que foi anteriormente seleccionada pelo árbitro do nível táctico. Para isso é definida uma área rectangular centrada na última decisão táctica (X_T, Y_T) , com dimensões respectivamente H_x e H_y .

São depois calculadas duas funções parciais (q_{hx} e q_{hy}) que representam a variação do favorecimento máximo a aplicar em função das alterações de velocidade e de posição lateral.

$$q_{hx}(x) = \begin{cases} 0 & \Leftarrow H_x \geq |X_T - x| \\ 1 - \frac{|X_T - x|}{H_x} & \Leftarrow H_x < |X_T - x| \end{cases} \quad (97)$$

$$q_{hy}(y) = \begin{cases} 0 & \Leftarrow H_y \geq |Y_T - y| \\ 1 - \frac{|Y_T - y|}{H_y} & \Leftarrow H_y < |Y_T - y| \end{cases} \quad (98)$$

A saída do módulo de histerese $Q_h(x, y)$ é finalmente obtida pelo produto destas duas funções parciais.

$$Q_h(x, y) = q_{hx} \cdot q_{hy} \quad (99)$$

A figura 125 apresenta um gráfico típico da saída deste módulo. Nesta figura é possível constatar o favorecimento sugerido para a acção anteriormente seleccionada e as suas vizinhas.

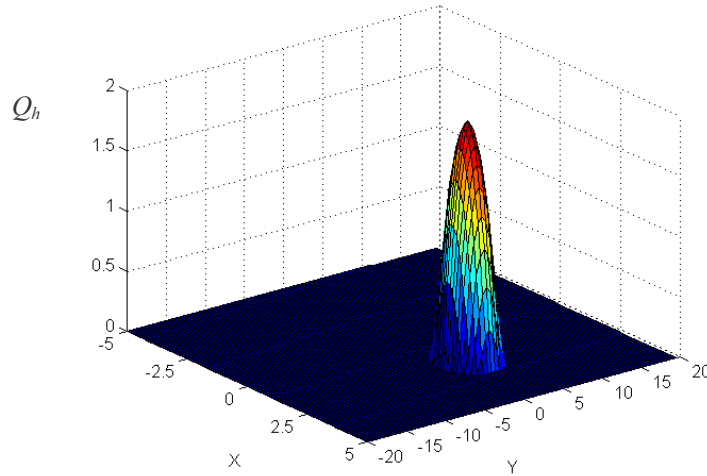


Figura 125. Saída do módulo de histerese

5.1.2.11 Módulo de sinalização

O módulo de sinalização, ainda não implementado, será responsável por garantir o cumprimento das regras impostas pela sinalização vertical que possa existir na estrada onde o veículo circula. Uma vez que o módulo de estrada trata já da sinalização horizontal

apresentada no pavimento, ao módulo de sinalização bastará tratar das imposições relativas a semáforos e outra sinalização vertical. Estas imposições são na sua maioria limitações da velocidade, pelo que este módulo será semelhante ao módulo de velocidade já implementado e descrito na secção 5.1.2.4.

Este módulo deve pesquisar na representação da rede viária as próximas ocorrências de sinalização vertical. No caso de ser detectado um sinal luminoso, será analisado o seu estado. Em seguida, o módulo de sinalização sugere as limitações de velocidade respectivas.

5.1.3 Nível operacional

O nível operacional toma as medidas imediatas necessárias para tentar cumprir os objectivos de curto prazo solicitados pelo nível tático. Decide em que pedal actuar e como posicionar o volante.

Nesta altura estão em fase de teste duas versões experimentais do nível operacional. Uma versão é baseada numa rede neuronal treinada com dados de condução de um condutor humano, obtidos no simulador. A outra versão, computacionalmente mais leve, é baseada em dois controladores independentes, um para a aceleração e outro para a direcção.

5.1.3.1 Versão com rede neuronal

São utilizadas como entradas as coordenadas do ponto objectivo tático (T), referidas ao referencial do veículo, a orientação do eixo da via no mesmo ponto (θ_t), a velocidade actual (v) e a velocidade final proposta para o ponto de objectivo tático (v_t).

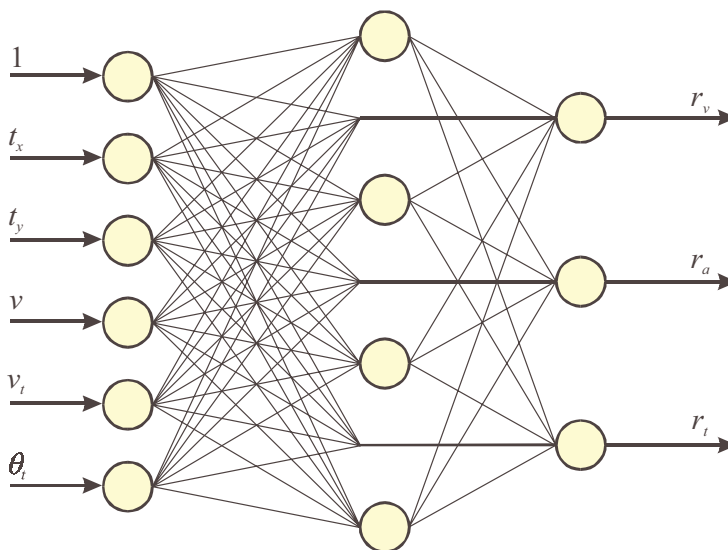


Figura 126. Rede neuronal

Foram testadas algumas topologias de redes neurais como por exemplo a apresentada na figura 126. Esta rede, não realimentada, é constituída por 6 elementos de entrada, 4

unidades ocultas, 3 elementos de saída e 54 pesos independentes. O treino foi efectuado por retropropagação do erro, calculado por comparação com dados de condução de humanos, obtidos no simulador. Para isso foi solicitado aos condutores humanos que conduzissem sobre uma linha (eixo da via) a uma velocidade constante. A rede demonstrou boa capacidade de aprendizagem e foi capaz de reproduzir situações de condução sobre um eixo de via, a velocidade constante.

No entanto, as experiências realizadas demonstraram a dificuldade de criação de uma metodologia de treino que permitisse considerar objectivos tácticos sugeridos por um nível superior. Para efectuar um treino correcto a partir de dados obtidos de condutores humanos, seria necessário conhecer os objectivos tácticos utilizados pelos condutores em cada instante. Os objectivos tácticos são variáveis internas de um condutor, e não é fácil identificá-los pela simples observação das acções operacionais realizadas.

Por outro lado, o treino de controladores deste tipo para situações mais típicas das vias públicas, com a influência de outros veículos e sem velocidade constante, obriga a uma primeira implementação de tráfego autónomo que permita depois obter os dados de treino a partir de condutores humanos. A qualidade do treino fica sempre dependente da qualidade desta primeira implementação do tráfego autónomo.

Por último, o peso computacional de um modelo deste tipo torna-o desadequado a uma utilização em sistemas de tempo real com múltiplos agentes.

5.1.3.2 Versão com controlador PID

A implementação actual do nível operacional baseia-se em dois módulos independentes. Um controlador longitudinal (secção 5.1.3.2.1), que trata de actuar nos pedais acelerador e travão de forma a satisfazer a sugestão do nível táctico para a velocidade, e um controlador de direcção (secção 5.1.3.2.2), que é responsável pela actuação no volante, tendo por objectivo o cumprimento da posição lateral proposta pelo nível táctico.

5.1.3.2.1 Controlador longitudinal

O controlador longitudinal é responsável pelo accionamento dos pedais acelerador e travão. Apesar de, nas situações reais, estes pedais poderem ser accionados de forma independente, optou-se pela implementação de um controlador único, seguido de um elemento desmultiplexador, capaz de provocar o accionamento exclusivo de cada um destes dois pedais. A figura 127 apresenta a interligação do controlador longitudinal com os pedais acelerador e travão.

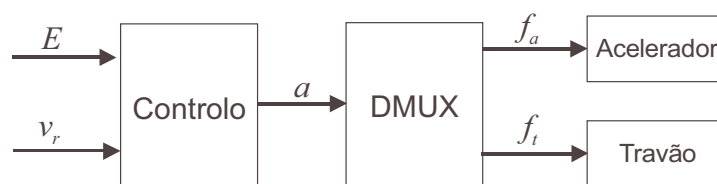


Figura 127. Arquitectura do controlador longitudinal

A ideia de utilizar um único controlador para o acelerador e para o travão é sugerida pelo facto de, numa condução normal, estes dois comandos serem mutuamente exclusivos. Esta ideia é atractiva, pois elimina os problemas associados com a implementação da comutação entre os dois comandos. Este facto garante um projecto mais simples do controlador e uma maior eficiência.

O módulo principal de controlo determina o valor da aceleração instantânea a aplicar, de forma a anular simultaneamente o erro de posição longitudinal (E) e o erro de velocidade (v_r). A aceleração sugerida por este módulo é aplicada ao elemento desmultiplexador (DMUX na figura 127) que é comparada com o valor da aceleração em vazio (a_0). Esta aceleração em vazio deve corresponder, aproximadamente, à desaceleração verificada pelo veículo, num plano horizontal, se tanto o pedal acelerador como o travão forem libertados. Quando a aceleração sugerida pelo controlador é superior a a_0 , o acelerador é accionado segundo a curva de binário inversa para a velocidade de rotação do motor actual. Quando a mesma aceleração é inferior a a_0 , é accionado o travão. Em qualquer dos casos o pedal não accionado é considerado libertado, ficando por isso na sua posição de repouso. A figura 128 apresenta um gráfico da resposta mecânica inversa considerada pelo elemento desmultiplexador.

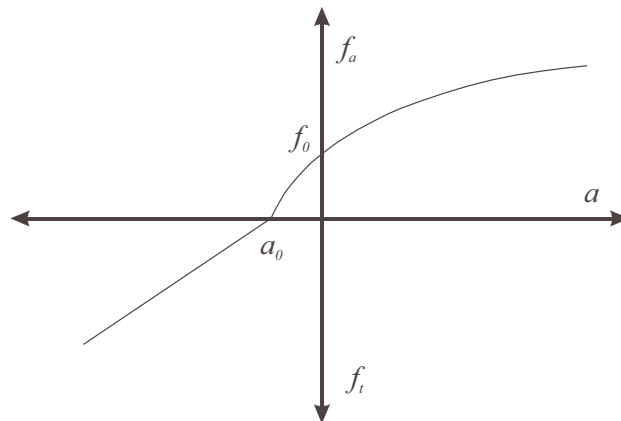


Figura 128. Resposta mecânica inversa

5.1.3.2.2 Controlador lateral

Para controlar a posição lateral do veículo na estrada, estão disponíveis duas implementações distintas. A primeira utiliza um controlador PID de forma semelhante ao apresentado para o controlo longitudinal. No entanto, já que no caso da direcção a simulação de nível físico do veículo é efectuada por um modelo cinemático (ver secção 4.7.2), é possível determinar com precisão qual a posição que deve ser atribuída ao volante para que o veículo cumpra a trajectória desejada. A este tipo de abordagem chama-se controlo por cinemática inversa.

Em qualquer dos casos (PID ou cinemática inversa), é obtido o ponto R deslocando a posição actual por uma rota paralela ao eixo da via à velocidade actual durante todo o

período tático (figura 129). A partir de R, é determinado o ponto de objectivo tático (T) afectando a posição lateral de acordo com a sugestão tática.

A partir da posição actual é definida uma trajectória $p(x)$ definida por um polinómio do terceiro grau, que conduz ao ponto de objectivo tático (T), com orientação paralela (em T) ao eixo da via.

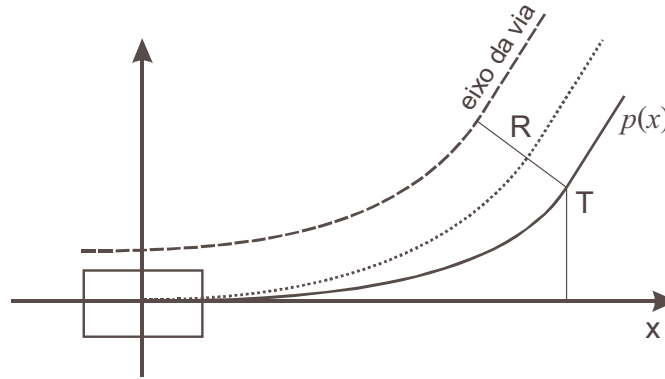


Figura 129. Trajectória seleccionada

Esta trajectória $p(x)$ pode ser definida por um polinómio do terceiro grau no referencial orientado com o veículo, como consta da equação (100). Este polinómio não possui termo constante nem termo de primeira ordem, já que a trajectória passa pela origem e a sua derivada na origem é nula.

$$p(x) = a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 \quad (100)$$

os coeficientes dos termos de segunda e terceira ordem podem ser obtidos por:

$$a_2 = \frac{3}{x_t^2} \cdot y_t - \frac{1}{x_t} \cdot y_t' \quad (101)$$

$$a_3 = \frac{2}{x_t^3} \cdot y_t - \frac{1}{x_t^2} \cdot 2 \cdot y_t' \quad (102)$$

onde x_t e y_t representam as coordenadas do ponto de objectivo tático T, referidas ao referencial alinhado com o veículo e y_t' o valor da tangente do ângulo de orientação do eixo da via no ponto mais próximo de T, considerando o mesmo referencial.

A orientação do veículo (θ) deverá variar de acordo com a derivada da expressão polinomial da trajectória (100):

$$\theta(x) = p'(x) = \frac{dp(x)}{dx} = 2 \cdot a_2 \cdot x + 3 \cdot a_3 \cdot x^2 \quad (103)$$

Para períodos de simulação operacional pequenos face aos períodos táticos considerados, é possível considerar a trajectória quase coincidente com o eixo x , pelo que o valor da curvatura pode ser aproximado pela segunda derivada da trajectória:

$$k(x) = \frac{d\theta}{ds} \cong \frac{d\theta}{dx} = p''(x) = 2 \cdot a_2 + 6 \cdot a_3 \cdot x \quad (104)$$

Assim, a curvatura inicial ($k(0)$) pode ser determinada pelo valor da equação (104) para $x=0$.

$$k(0) = 2 \cdot a_2 = \frac{6}{x_t^2} \cdot y_t - \frac{2}{x_t} \cdot y'_t \quad (105)$$

Para cumprir a trajectória, o ângulo de rotação inicial a atribuir ao volante (r_v) durante o primeiro período de simulação operacional será:

$$r_v = G^{-1}(2 \cdot a_2) = G^{-1}\left(\frac{6}{x_t^2} \cdot y_t - \frac{2}{x_t} \cdot y'_t\right) \quad (106)$$

onde $G^{-1}(r)$ é a função inversa da resposta do volante $G(r)$, característica do modelo dinâmico do veículo.

5.1.4 Nível dinâmico

O nível dinâmico corresponde ao modelo físico dos veículos autónomos. Este modelo é derivado do modelo do veículo conduzido interactivamente, e que foi já descrito na secção 4.7. Cada veículo (autónomo ou conduzido interactivamente) incorpora uma instância do modelo apresentado. Cada uma destas instâncias pode ser parametrizada de forma independente para simular veículos distintos. No caso dos veículos autónomos, é também normal a aplicação de simplificações por motivos de eficiência.

5.2 Variação do nível de detalhe de comportamento

A utilização de diversos níveis de detalhe de comportamento é importante quando o modelo de comportamento é exigente em termos de processamento e o número de objectos controlados por comportamento é elevado. Nestes casos, o tempo de processamento necessário para a resolução de todos os modelos comportamentais pode facilmente atingir valores incompatíveis com os requisitos da simulação em tempo real. A ideia da utilização de modelos de comportamento definidos em diversos níveis de detalhe surge assim da constatação de que não é necessário simular o comportamento de um objecto distante com o mesmo realismo e a mesma precisão que o de um objecto próximo. Para os objectos distantes, são toleradas algumas imperfeições comportamentais, uma vez que estas dificilmente serão perceptíveis pelo observador humano.

Esta ideia é já conhecida e frequentemente utilizada quando aplicada ao detalhe geométrico em sistemas de síntese de imagem, conforme foi descrito anteriormente. Alguns sistemas gráficos vocacionados para aplicações de tempo real como o VRML [VRML97] ou o SGI *Performer* [Hartman91] permitem que cada objecto seja definido com diversos conjuntos de primitivas tridimensionais, correspondentes a níveis de detalhe diferentes. Os geradores de imagem são depois capazes de seleccionar a representação apropriada, de acordo com a distância para o observador.

As aproximações descritas na secção 3.7 também podem ser relacionadas com a redução da complexidade do processamento comportamental para os objectos mais distantes. No entanto, como foi referido na mesma secção, essas abordagens apresentam alguns problemas.

A abordagem proposta tenta resolver os problemas atribuídos às técnicas existentes de optimização da simulação comportamental, ajustando a precisão com que o modelo comportamental é resolvido, em função da distância para o ponto de observação [Leitão00c]. Independentemente do facto de um objecto estar ou não visível, o seu comportamento é sempre simulado, podendo assim movimentar-se e recuperar uma posição de visibilidade. Esta possibilidade evita os problemas da falta de coerência estratégica e da dificuldade de especificação de ambientes que podem ocorrer quando se utiliza a técnica da eliminação de objectos distantes, descrita anteriormente. Para além disso, aos objectos mais afastados são aplicados algoritmos de simulação mais simples, permitindo assim uma redução do tempo de processamento necessário para a simulação de toda a cena.

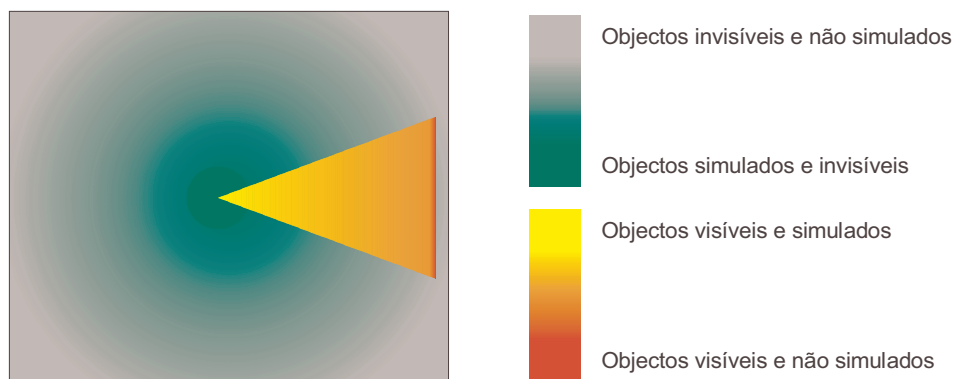


Figura 130. Variação do nível de detalhe comportamental com a distância

A implementação prática desta técnica de variação do nível de detalhe comportamental exige que sejam disponibilizadas várias versões do modelo comportamental para cada elemento autónomo. Estas versões deverão corresponder a diferentes níveis de complexidade computacional. De uma maneira geral, a simplificação de um modelo comportamental pode ser obtida pela supressão de módulos ou tarefas internas que possam ser consideradas como não essenciais. A identificação destes módulos ou tarefas e a preparação e afinação das várias versões dos modelos simplificados é portanto um trabalho árduo, tal como acontecia com a preparação dos diversos níveis de detalhe geométrico com

que um objecto pode ser representado. Infelizmente, a concepção de ferramentas genéricas automatizadas de simplificação é ainda mais complexa para os modelos comportamentais do que para as malhas poligonais utilizadas para a representação geométrica dos objectos.

No entanto, existe uma classe de modelos comportamentais para os quais é relativamente simples reduzir o processamento necessário para a obtenção de uma decisão, embora com um pequeno prejuízo na qualidade da mesma decisão. Estes modelos utilizam um módulo designado por árbitro, que realiza uma pesquisa num espaço de decisão para seleccionar a decisão considerada com maior qualidade [Rosenblatt97]. Limitando a pesquisa a um conjunto restrito de decisões, obtém-se normalmente uma decisão de qualidade razoável com tempos de processamento inferiores.

5.2.1 Implementação

Como foi apresentado ao longo da secção 5.1, o modelo dos veículos autónomos utilizados no simulador de condução DriS utiliza quatro níveis independentes para representar os processos de decisão e de funcionamento de um conjunto condutor / veículo.

Tal como era esperado e como se encontra demonstrado pelas experiências realizadas, o nível táctico revelou-se o componente de um veículo autónomo mais absorvente de recursos de processamento. Isto deverá também acontecer em agentes autónomos de outros tipos, para os quais não seja essencial a qualidade das decisões estratégicas. Adicionalmente, a qualidade do comportamento de longo prazo depende essencialmente dos níveis superiores do modelo comportamental (estratégico e táctico). Por estas razões, pode-se concluir que é ao nível táctico que mais se justifica implementar a selecção do nível de detalhe.

Conforme foi descrito na secção respectiva (5.1.2), existe, neste nível, um módulo árbitro que selecciona a acção táctica a tomar pela amostragem do espaço de decisão e escolhendo o valor mais elevado da qualidade. Variando a taxa de amostragem do espaço de decisão, provoca-se uma alteração no processamento requerido para a obtenção da solução e também a precisão com que esta é tomada.

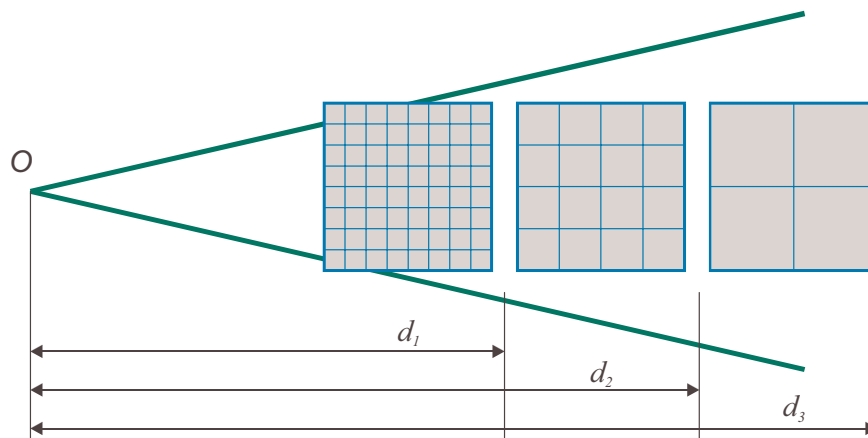


Figura 131. Variação da taxa de amostragem com a distância

Na implementação actual, o espaço de decisão táctica é analisado utilizando uma grelha rectangular de amostras (figura 131). Primeiro é seleccionado o número de amostras proposto (NA) que varia inversamente com a distância (d) ao ponto de observação entre um máximo e um mínimo, conforme se apresenta no gráfico da figura 132.

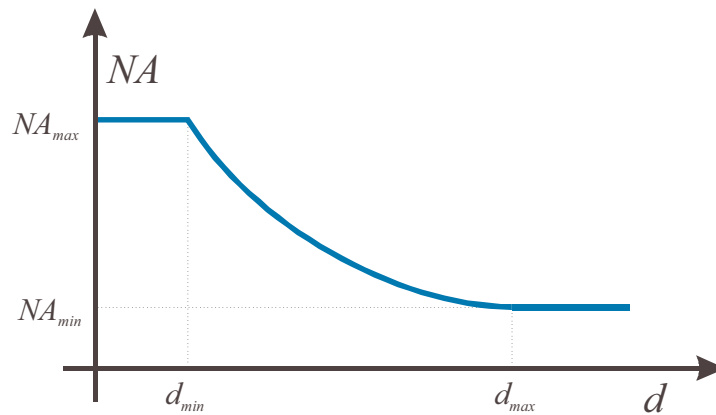


Figura 132. Variação do número de amostras com a distância de visualização

Em seguida, o espaço de decisão é amostrado segundo uma grelha rectangular uniforme, até que o número de amostras obtidas seja igual ou superior ao proposto (NA). A qualidade de cada uma das acções representadas por cada amostra é avaliada e é seleccionada a decisão com a qualidade máxima. Admite-se que o número de amostragens possa ainda crescer acima de (NA), se nenhuma destas amostras resultar numa acção considerada como aceitável. Se cada uma das (NA) amostras receber pelo menos um veto de qualquer um dos módulos tácticos, o processo de amostragem continua até que seja obtida uma acção não vetada.

Para manter a possibilidade de selecção de acções com histerese, foi imposto que uma das amostras fosse sempre coincidente com a última acção escolhida. O valor desta amostra é sempre afectado pelo módulo de histerese que lhe adiciona a última acção escolhida, depois de um escalamento por um factor de histerese inferior a 1.

A metodologia de selecção do número de amostras pode ser alterada de acordo com os objectivos da simulação. De uma maneira geral, para espaços de decisão bidimensionais como o utilizado no nível táctico do modelo de condutor desenvolvido, o número de amostras deverá variar preferencialmente com o inverso do quadrado da distância de visualização. Esta variação do número de amostras deve ser sempre limitada entre dois valores, um mínimo e um máximo. O número máximo de amostras deve ser especificado tendo em conta a precisão suficiente para a simulação dos objectos próximos do ponto de visualização. O número mínimo de amostras deve ser especificado tendo em conta a manutenção da coerência estratégica da simulação dos objectos distantes.

Assim, se for especificado o número máximo de amostras (NA_{max}) e a distância mínima (d_{min}) abaixo da qual este máximo é aplicado, em conjunto com o número mínimo de

amostras (NA_{min}) e a distância máxima (d_{max}) acima da qual é aplicado o número mínimo de amostras, o número de amostras pode ser determinado por:

$$\sqrt{NA} = \begin{cases} \sqrt{NA_{max}} & \Leftarrow d \leq d_{min} \\ a - b \cdot d & \Leftarrow d_{min} < d < d_{max} \\ \sqrt{NA_{min}} & \Leftarrow d \geq d_{max} \end{cases} \quad (107)$$

onde a e b podem ser determinados a partir de NA_{min} , NA_{max} , d_{min} e d_{max} :

$$\begin{cases} a = \frac{d_{max} \cdot \sqrt{NA_{max}} - d_{min} \cdot \sqrt{NA_{min}}}{d_{max} - d_{min}} \\ b = \frac{\sqrt{NA_{max}} - \sqrt{NA_{min}}}{d_{max} - d_{min}} \end{cases} \quad (108)$$

Um exemplo de aplicação desta metodologia de selecção do número de amostras, é apresentado na secção 5.2.2.

5.2.2 Avaliação de desempenho

Para se avaliar o efeito da utilização da selecção de níveis de detalhe ao comportamento dos objectos, foram realizadas duas experiências [Leitão00b]. A primeira (desempenho temporal) teve por objectivo quantificar a aceleração permitida pela utilização do algoritmo proposto. A segunda (desempenho comportamental) teve por objectivo a comparação dos comportamentos dos objectos afectados por este método com os comportamentos originais.

Ambas as experiências foram realizadas no simulador de condução DriS utilizando veículos autónomos numa estrada em circuito fechado de mais de 11 Km de perímetro, cuja planta se apresenta na figura seguinte.

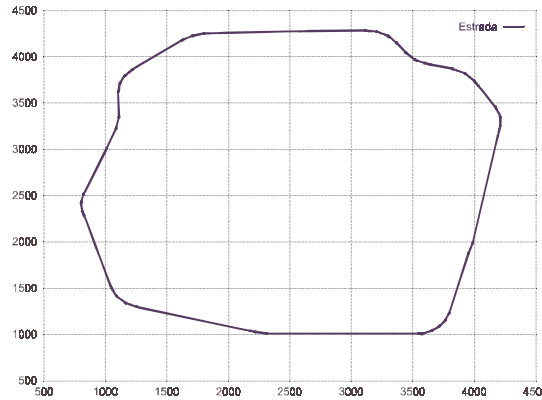


Figura 133. Planta do circuito utilizado na experiência

O número de amostras realizadas em cada ciclo táctico foi limitado entre $NA_{min}=9$ e $NA_{max}=400$. Para objectos localizados a uma distância da câmara inferior a 40 metros, aplicou-se sempre a taxa de amostragem máxima (400 amostras). Para os objectos que distavam mais de 400 metros, o número de amostras realizadas foi o mínimo admitido (9). Nos outros casos (distâncias entre 40 e 400 metros) o número de amostras propostas (NA) é o resultante da instanciação das equações (107) e (108), de onde se obtém:

$$\sqrt{NA} = INT\left(21.89 - \frac{d}{21.18}\right) \quad (109)$$

Onde d se refere à distância para o objecto que transporta a câmara utilizada na geração de imagem.

5.2.2.1 Desempenho temporal

Para avaliar a aceleração produzida pela utilização do método da selecção automática do nível de detalhe de comportamento, foi realizada uma experiência de simulação de condução não interactiva. A experiência foi decomposta em três ensaios:

- (A) mantendo todos os veículos autónomos com o melhor nível de detalhe;
- (B) sem selecção do nível de detalhe de comportamento mas eliminando objectos afastados e os respectivos comportamentos;
- (C) com utilização da selecção do nível de detalhe de comportamento.

Estas três situações correspondem a impor uma variação do número de amostras (NA) com a distância ao ponto de observação (d), como se apresenta nos gráficos da figura 134.

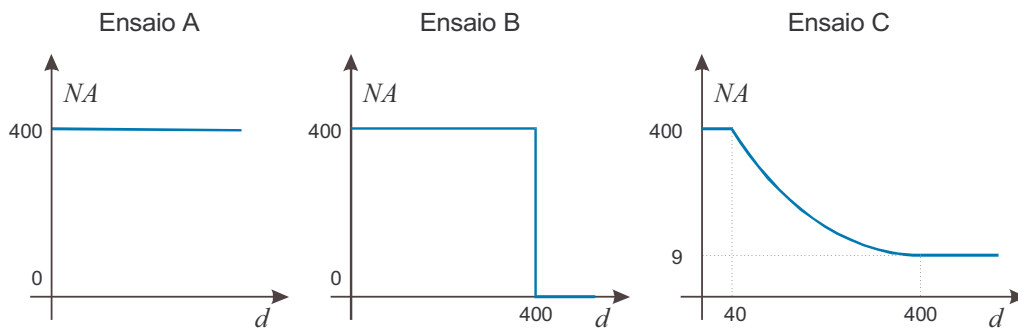


Figura 134. Variação do número de amostras proposto com a distância, em cada ensaio

Utilizaram-se 78 veículos autónomos divididos pelos dois sentidos de circulação do percurso apresentado. Apesar de todos os veículos resolverem internamente o modelo comportamental descrito na secção 5.1, os seus movimentos foram manipulados de forma a seguirem um percurso predefinido. Esta imposição permitiu garantir a manutenção das condições de simulação nos diversos ensaios. Um dos 78 veículos foi seleccionado para transportar a câmara utilizada para a geração da imagem. O número de amostragens

realizadas pelo árbitro de cada veículo autónomo foi contabilizado e armazenado para posterior análise. Nesta contabilização excluiu-se o veículo que transportava a câmara.

Cada ensaio durou pouco mais de 24 minutos e o nível tático foi resolvido a uma frequência de 5 Hz. Foram portanto executados 7329 ciclos táticos. O número total de amostras (TS) realizadas pelos árbitros dos níveis táticos dos diversos veículos foi:

$$TS_a = 225\,733\,200 \text{ amostras}$$

$$TS_b = 14\,069\,600 \text{ amostras}$$

$$TS_c = 9\,200\,301 \text{ amostras}$$

Na figura 135 apresenta-se um gráfico que permite comparar os número de amostras realizadas em cada um dos ensaios.

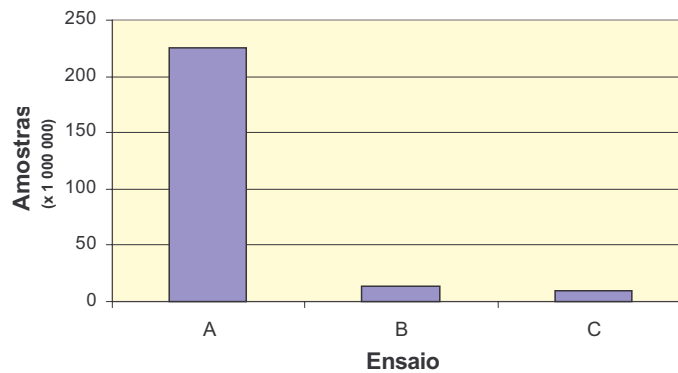


Figura 135. Número de amostras realizadas em cada ensaio

Como seria de esperar, o número total de amostras do ensaio A corresponde à realização do número máximo de amostras (400) admitido para cada ciclo tático de cada veículo autónomo:

$$TS_a = 400 \times 77 \times 7329 = 225\,733\,200 \quad (110)$$

Comparando TS_b com TS_a , constata-se que a utilização da técnica da eliminação dos elementos autónomos distantes permite uma redução do número de amostragens realizadas de cerca de 94%, quando comparada com a simulação normal de todos os veículos com o máximo nível de detalhe.

$$\frac{TS_b}{TS_a} = 6.23\% \quad (111)$$

Esta excelente redução do número de amostras realizadas é compreensível face às dimensões do mundo virtual utilizado. No caso de a distribuição dos veículos ao longo da estrada ser uniforme, é possível obter uma aproximação da percentagem de veículos na área observável pela determinação da percentagem de estrada dentro dos limites da área

observável (círculo com 400m de raio). A figura 136 apresenta a circunferência correspondente ao limite da área observável sobreposto à estrada utilizada.

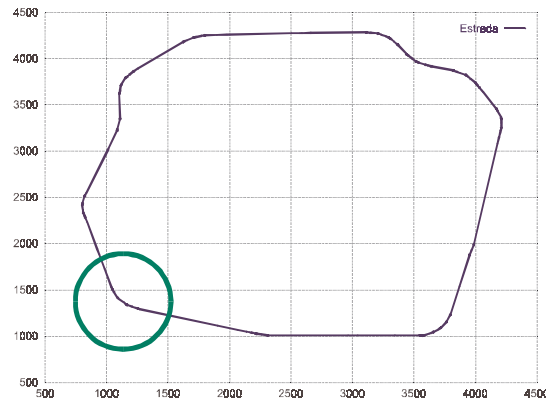


Figura 136. Área observável da estrada

Aproximando a estrada a uma linha recta, esta percentagem seria:

$$\frac{800m}{11km} = 7.2\% \quad (112)$$

o que não fica muito distante do valor obtido para a variação do número de amostras apresentado na expressão (111). Deve-se no entanto ter em atenção que esta redução do número de amostras não se traduz directamente numa economia de processamento da mesma grandeza, uma vez que a utilização desta técnica obriga a processamentos adicionais. Realmente, quando se eliminam os elementos autónomos que se afastam significativamente da área observável, é necessário recriar novos elementos autónomos em locais e instantes seleccionados, de forma a manter o realismo da simulação. Uma escolha razoável de quando e onde criar novos elementos implica normalmente algum processamento adicional, que não pode ser desprezado na avaliação da aceleração produzida pela utilização desta técnica.

Comparando TS_c com TS_b , constata-se que a utilização da selecção de nível de detalhe comportamental no nível táctico destes veículos autónomos permitiu uma redução do número de amostragens realizadas de cerca de 35%, quando comparada com a técnica da eliminação dos elementos autónomos afastados da câmara:

$$\frac{TS_c}{TS_b} = 65.39\% \quad (113)$$

Quando comparada com a simulação normal de todos os veículos com o máximo nível de detalhe, a técnica da selecção do nível de detalhe comportamental mostrou provocar uma redução drástica de cerca de 96%:

$$\frac{TS_c}{TS_a} = 4.08\% \quad (114)$$

5.2.2.2 Desempenho comportamental

Para avaliar a degradação da qualidade das decisões produzidas pelo modelo comportamental quando se utiliza a variação do nível de detalhe, está neste momento a ser preparada uma experiência adicional que decorrerá em dois ensaios, um com e outro sem a utilização da variação do nível de detalhe comportamental.

Nesta experiência será utilizado um número elevado de veículos autónomos, de forma a produzir uma densidade de tráfego razoável. A experiência terá uma duração suficiente para que possam ser notados os efeitos de acumulação temporal dos erros introduzidos pela variação do nível de detalhe comportamental. Durante toda a experiência serão recolhidos parâmetros como a posição lateral do veículo relativamente ao eixo da via e a sua velocidade. Estes dados serão depois analisados estatisticamente.

Deve no entanto ser notado que, à semelhança das considerações apresentadas em [Carlson97] e em [Chenney97] para as metodologias respectivas, uma métrica precisa da degradação introduzida pelo método será muito difícil de concretizar, um vez que nem todos os desvios introduzidos pelo método serão visíveis para o utilizador. Há no entanto desvios que podem ser acumulados ao longo do tempo, de forma a tornarem-se perceptíveis no futuro ou a prejudicar o desempenho expectável de outros agentes reactivos.

Para além disso, nem todos os desvios são sentidos por um observador humano da mesma forma. Quando um elemento autónomo reentra numa zona de visibilidade após um período de ausência, o seu estado é comparado com o estado expectável pelo observador, face às últimas observações realizadas. Se o período de invisibilidade for muito longo, aumenta a incerteza sobre o estado expectável e mesmo os desvios anormais podem-se tornar imperceptíveis.

É no entanto razoável assumir que a qualidade dos comportamentos obtidos pela aplicação da variação do nível de detalhe comportamental não será nunca inferior à qualidade obtida com a eliminação da simulação de objectos distantes, devido aos problemas associados a esta metodologia, já apresentados na secção 3.7. Ao manter sempre a simulação de todos os objectos, mesmo os mais distantes, a técnica da variação do nível de detalhe comportamental reduz muito significativamente esses problemas. As simplificações introduzidas na simulação de objectos não muito distantes, apesar de prejudicarem o realismo da simulação, são normalmente compensadas pela diminuição da observabilidade dos mesmos objectos, e portanto também dos desvios cometidos.

Uma demonstração analítica deste desempenho superior pode ser obtida assumindo que o erro comportamental observável (E) varia inversamente com o aumento da distância de visualização (d). Para isso, considere-se que o erro cometido por um veículo autónomo (e_i) é uma variável aleatória com distribuição uniforme entre 0 e um valor máximo (e_{max}), que depende apenas da densidade de amostras utilizadas pelo módulo árbitro do nível tático

(NA). Se estas amostras forem distribuídas uniformemente segundo uma grelha quadrangular, o erro máximo, segundo uma dimensão do espaço de decisão considerado, será dado pela metade da distância da área de uma amostra, com indica a equação (115).

$$e_{max} = \frac{A}{2 \cdot \sqrt{NA}} \quad ; \sqrt{NA} \in \mathbf{N} \quad (115)$$

em que A representa a dimensão do espaço de decisão, onde se encontram as acções possíveis (incluindo a ideal), e onde são realizadas as NA amostras. Uma vez que se admite que este espaço de decisão é conhecido à partida, faz sentido estimar, como metade da dimensão deste espaço, o erro máximo cometido quando não é efectuada qualquer simulação no nível tático ($NA=0$).

$$\sqrt{NA} = 0 \Rightarrow e_{max} = \frac{A}{2} \quad (116)$$

Como era esperado, o valor do erro máximo quando $NA=0$, dado pela expressão (116), é igual ao valor obtido da expressão (115), quando $NA=1$.

O erro médio cometido pelo veículo (e_i) pode então ser dado por:

$$e_i = \frac{e_{max}}{2} = \begin{cases} \frac{A}{4 \cdot \sqrt{NA}} & \Leftarrow \sqrt{NA} \geq 1 \\ \frac{A}{4} & \Leftarrow \sqrt{NA} = 0 \end{cases} \quad (117)$$

O erro observável do mesmo veículo (E_i) pode ser assumido como sendo:

$$E_i = e_i \cdot \frac{d_{min}}{d_i} \quad (118)$$

onde d_i é a distância de visualização do veículo i , e d_{min} é a distância mínima a que o mesmo veículo pode ser observado ou aquela que permite a observação completa de todos os erros comportamentais cometidos.

O erro médio observável corresponderá à soma dos erros observáveis de todos os veículos presentes no campo de visão. Considerando que os veículos se encontram uniformemente distribuídos pela distância de visualização com uma densidade de ρ veículos por unidade de distância, o erro médio total observável será:

$$E = \int_{d_{min}}^{d_{max}} \rho \cdot E_i \cdot \partial d_i \quad (119)$$

Este tipo de distribuição é aceitável para o caso de veículos que circulam em vias rodoviárias aproximadamente rectas. A aplicação desta análise a outros tipos de agentes poderia implicar a utilização de funções de densidade espacial de agentes.

Integrando a expressão (119) para os casos dos ensaios B e C da experiência de avaliação descrita anteriormente, obtêm-se as expressões dos erros médios observáveis quando é utilizada a técnica de eliminação da simulação de objectos distantes (E_B) e quando é utilizada a variação de detalhe comportamental (E_C). Para resolver numericamente os integrais, utiliza-se o intervalo de visibilidade $[d_{min}, d_{max}]$ entre 2 metros e 1 km. No caso do ensaio B, o intervalo de integração deve ser dividido em dois subintervalos: para as distâncias de visibilidade até 400 metros, utiliza-se um número de amostras (NA) constante e igual a 400; para distâncias de visibilidade superiores, o número de amostras é zero.

$$E_B = \frac{\rho \cdot A \cdot d_{min}}{4 \cdot \sqrt{400}} \cdot \int_2^{400} \frac{1}{d_i} \cdot \partial d_i + \frac{\rho \cdot A \cdot d_{min}}{4} \cdot \int_{400}^{1000} \frac{1}{d_i} \cdot \partial d_i \quad (120)$$

$$E_B = \frac{\rho \cdot A \cdot 2}{80} \cdot \ln \frac{400}{2} + \frac{\rho \cdot A \cdot 2}{4} \cdot \ln \frac{1000}{400} = 0.59 \cdot \rho \cdot A \quad (121)$$

Para o caso do ensaio C, o período de integração deve ser dividido em três partes.

$$E_C = \int_{d_{min}}^{d_{max}} \rho \cdot E_i \cdot \partial d_i = E_C^1 + E_C^2 + E_C^3 \quad (122)$$

Para distâncias de visualização inferiores a 40 metros, o número de amostras (NA) é constante e igual ao seu valor máximo (400).

$$E_C^1 = \frac{\rho \cdot A \cdot d_{min}}{4 \cdot \sqrt{400}} \cdot \int_2^{40} \frac{1}{d_i} \cdot \partial d_i = \frac{\rho \cdot A}{40} \cdot \ln \frac{40}{2} = 0.075 \cdot \rho \cdot A \quad (123)$$

Para distâncias entre 40 metros e 400 metros, o número de amostras (NA) é dependente da distância de visualização, de acordo com a expressão (109). Nesta aproximação ignora-se o arredondamento para inteiros indicado nesta mesma expressão.

$$E_C^2 = \frac{\rho \cdot A \cdot d_{min}}{4} \cdot \int_{40}^{400} \frac{1}{d_i \cdot \left(21.89 - \frac{d_i}{21.18}\right)} \cdot \partial d_i \quad (124)$$

$$E_C^2 = \frac{\rho \cdot A}{2 \cdot 21.89} \cdot \left[\ln(d_i) - \ln(21.89 \cdot 21.18 - d_i) \right]_{40}^{400} \quad (125)$$

$$E_C^2 = \frac{\rho \cdot A}{2 \cdot 21.89} \cdot (\ln 400 - \ln 63.6 - \ln 40 + \ln 423.6) = 0.096 \cdot \rho \cdot A \quad (126)$$

Por último, para distâncias de visualização superiores a 400 metros, o número de amostras (NA) volta a tomar um valor fixo, mas agora correspondente ao seu valor mínimo (9).

$$E_C^3 = \frac{\rho \cdot A \cdot d_{min}}{4 \cdot \sqrt{9}} \cdot \int_{400}^{1000} \frac{1}{d_i} \cdot \partial d_i = \frac{\rho \cdot A}{6} \cdot \ln \frac{1000}{400} = 0.153 \cdot \rho \cdot A \quad (127)$$

Adicionando os três integrais parciais (E_C^1, E_C^2 e E_C^3), obtém-se o valor do erro médio observável para o ensaio C.

$$E_C = E_C^1 + E_C^2 + E_C^3 = 0.324 \cdot \rho \cdot A \quad (128)$$

Comparando este valor com o mesmo erro relativo ao ensaio B, é possível concluir que a utilização da variação do nível de detalhe comportamental permitiu reduzir significativamente o erro comportamental observável, relativamente à situação de eliminação dos objectos distantes e dos seus comportamentos.

$$\frac{E_C}{E_B} = 54.8 \% \quad (129)$$

5.3 Controlo dos agentes autónomos

Como foi referido na secção 3.6.3.2, a possibilidade de inclusão de veículos com um elevado nível de autonomia, simplifica o processo de criação de ambientes dinâmicos e complexos, mas não é suficiente para a implementação das situações de tráfego necessárias à realização de estudos científicos nos simuladores de condução. Para permitir a implementação exacta das situações de tráfego a estudar, deve ser possível controlar pelo menos alguns dos elementos autónomos que povoam a cena.

Na secção 3.6 foram referidas algumas tecnologias utilizadas na implementação de veículos controlados em simuladores de condução. Estes veículos são normalmente concebidos com modelos próprios, independentes dos modelos utilizados para a geração do tráfego ambiente. Para o simulador de condução DriS, optou-se por uma abordagem integrada, capaz de implementar veículos autónomos e veículos controlados, a partir de um único modelo. Esta abordagem integrada, já referida no início do capítulo 5, permite ainda que os veículos possam ser controlados por ordens correspondentes a diversos níveis de abstracção. Quando é fornecida uma ordem de alto nível a um veículo, ele mantém intacta toda a autonomia de nível inferior à ordem recebida, de forma a procurar atingir o seu cumprimento.

5.3.1 Arquitectura

Para controlar os veículos autónomos num cenário de simulação de condução, foi implementado um módulo supervisor, único para toda a cena. Este módulo comunica com cada um dos diversos níveis de cada um dos veículos autónomos, como se observa nas figuras 60 e 103.

O controlo implementado pelo módulo supervisor é definido num guião de controlo elaborado pelo preparador da experiência. Estes guiões de controlo podem ser elaborados numa linguagem gráfica baseada em Grafset, utilizando um editor próprio, ou em modo de texto, utilizando uma linguagem estruturada, desenvolvida especialmente para o efeito. É

ainda possível realizar uma primeira especificação em Grafcet, converter o guião para texto, e depois utilizar um editor de texto para alterar ou afinar o guião, conforme se esquematiza na figura 137.

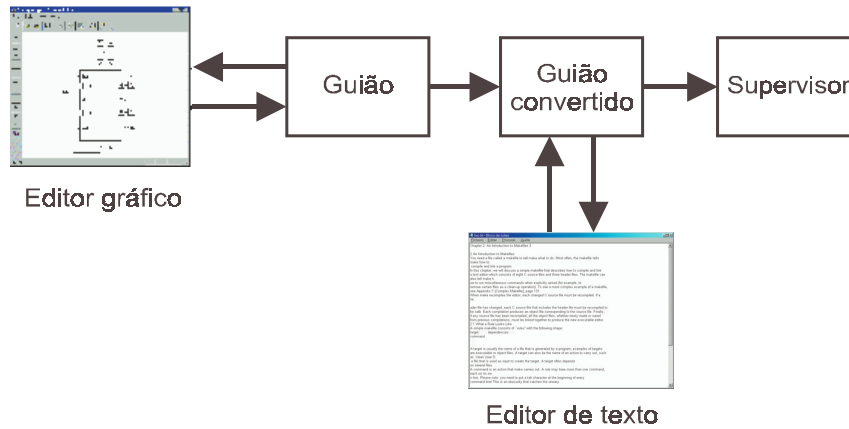


Figura 137. Elaboração de guiões de controlo

A linguagem gráfica Grafcet é apresentada no anexo B. Uma breve descrição do editor desenvolvido é apresentada na secção 5.3.4.

Para permitir a utilização de diagramas Grafcet na imposição de directivas de controlo externo dos veículos virtuais autónomos, no simulador DriS, foram implementados conjuntos de comandos e de sensores específicos, que se apresentam nas secções seguintes.

5.3.2 Comandos

Em cada etapa o preparador pode provocar a execução de um comando que é associado a um dos veículos autónomos que circulam na rede rodoviária simulada. Cada comando pode consistir numa imposição de um novo valor à variável numérica que representa qualquer um dos parâmetros utilizados internamente pelo modelo comportamental.

Os comandos que podem actualmente ser utilizados para dirigir os veículos virtuais autónomos no simulador DriS, são:

- Velocidade desejada
- Destino
- Aceleração máxima
- Desaceleração máxima
- Posição do volante
- Posição dos pedais
- Selecção da caixa de velocidades
- Velocidade actual
- Aceleração actual
- Posição e orientação

- Frustração
- Limite de Frustração
- Impaciência
- Distância de Segurança
- Máxima aceleração centrípeta
- Ganho do erro de velocidade
- Aleatoriedade
- Coeficiente de histerese
- Preferência centro de faixa
- Preferência tracejado
- Preferência traço contínuo

Para além da manipulação directa destas variáveis numéricas, o preparador da experiência pode afectar as decisões tácticas dos veículos autónomos, através do favorecimento ou da penalização de áreas do espaço de decisão. Para isso, o preparador apenas tem de especificar a área do espaço de decisão que deseja afectar e o valor da afectação. Este valor vai depois ser adicionado ao conjunto dos outros módulos tácticos pelo módulo de junção de comandos descrito na secção 5.1.2.2. A utilização deste comando com um valor de favorecimento positivo corresponde a uma aplicação da técnica da cenoura, referida na secção 3.8.1. A área especificada vai conter um conjunto de acções sugeridas pelo valor de favorecimento, mas não impostas. O veículo cujo espaço de decisão é afectado mantém a sua autonomia para poder seleccionar ou não uma acção do conjunto sugerido. A aplicação da técnica do chicote é conseguida pela afectação de um favorecimento negativo a uma área do espaço de decisão.

5.3.3 Sensores

Nas experiências típicas de simulação de condução, a sequência das directivas de controlo dos objectos de tráfego é realizada sobretudo em função dos acontecimentos de tráfego captados através de sensores. Actualmente estão disponíveis diversos sensores que permitem adquirir facilmente um determinado estado do tráfego. A tabela 9 apresenta alguns dos sensores virtuais implementados.

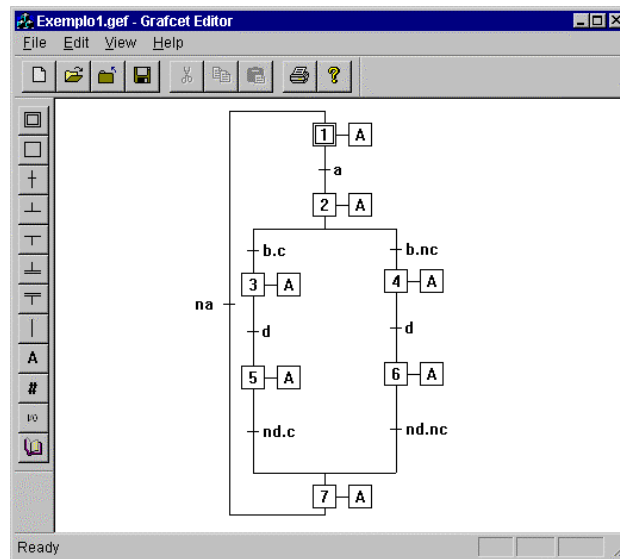
Grças às facilidades oferecidas pelos preprocessadores de macros utilizados, o preparador da experiência pode muito facilmente definir sensores mais complexos através da combinação destes sensores elementares e até constituir bibliotecas de sensores em ficheiros separados. Estas bibliotecas podem depois ser incluídas sempre que se justifique a sua utilização numa experiência futura.

Tabela 9. Sensores implementados

Sensor	Descrição
Pos(A)	Posição absoluta do veículo A
Lpos(A)	Posição Longitudinal do veículo A
Opos(A)	Posição lateral (offset) do veículo A
Dist(A,B)	$ \text{Pos(A)} - \text{Pos(B)} $
Ldist(A,B)	$\text{LPos(A)} - \text{LPos(B)}$
Odist(A,B)	$\text{OPos(A)} - \text{OPos(B)}$
Speed(A)	Velocidade do veículo A
Wheel(A)	Posição do volante do veículo A
Break(A)	Posição do pedal de travão

5.3.4 Editor interativo

Para simplificar o processo de preparação de experiências no simulador de condução, desenvolveu-se um editor de Grafcet que permite a criação de esquemas genéricos de Grafcet. Este editor foi desenvolvido em MS-Visual C++ e corre num ambiente MS-Windows. Oferece todas as funções clássicas de edição de documentos como a gravação, o carregamento, e a impressão. Ferramentas dedicadas à criação de diagramas de Grafcet são disponibilizadas por uma caixa de ferramentas colocada à esquerda. Foram também desenvolvidas as ferramentas que permitem a importação de um ou mais diagramas pelo simulador de condução.

**Figura 138.** Editor de Grafcet

Uma descrição mais detalhada deste editor e da sua implementação pode ser encontrada em [Marques99].

5.3.5 Exemplos de aplicação

Na figura 139 apresenta-se uma experiência típica de simulação de condução designada por "Ultrapassagem Concorrente".

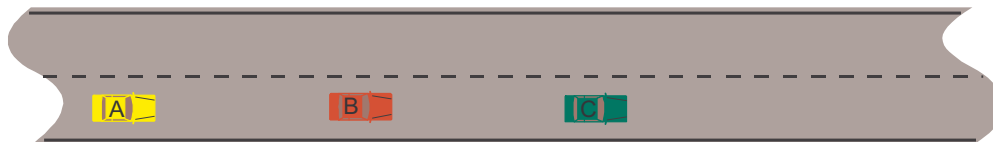


Figura 139. Situação inicial da experiência da Ultrapassagem Concorrente

Nesta experiência pretende-se estudar a reacção de um condutor que se encontra a executar uma manobra de ultrapassagem quando o veículo que está a ser ultrapassado inicia, ele próprio, uma ultrapassagem simultânea a outro veículo. Isto pode ser exemplificado numa estrada de duas vias, com três veículos a deslocarem-se pela via da direita (figura 139).

Quando o veículo (A) se encontra a ultrapassar o veículo do meio (B), este pode também iniciar uma manobra para ultrapassar o veículo antecessor (C), originando uma situação crítica, conforme se constata na figura 140.

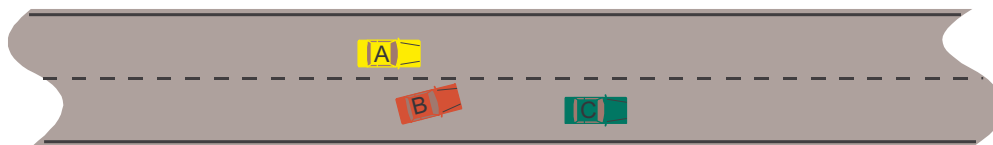


Figura 140. Situação crítica da Ultrapassagem Concorrente

Neste caso, ao condutor do veículo A é exigido que decida rapidamente qual a acção a tomar. As opções disponíveis podem ser resumidas em:

- Acelerar, de forma a forçar a manobra de ultrapassagem pretendida;
- Efectuar um desvio para a esquerda de forma a evitar o veículo B;
- Abrandar, desistindo da manobra de ultrapassagem pretendida.

Esta decisão e a forma como é tomada poderá ser o principal tema de um estudo destes.

Para implementar esta situação, os três veículos são simulados numa via em linha recta. Os dois primeiros veículos (B e C) são deslocados autonomamente e o condutor humano em teste (sujeito) conduz o veículo perseguidor. Apesar de ambos os veículos B e C poderem ser considerados autónomos, apenas C pode ser simulado de forma completamente autónoma. Ao veículo B deve ser requerido que se mantenha atrás de C, possivelmente a uma distância especificada até que o veículo A esteja a efectuar a manobra de ultrapassagem. Nesta altura, e exactamente no momento seleccionado, o veículo B deve iniciar a sua manobra de ultrapassagem. Portanto, o veículo C pode ser ordenado para se deslocar a uma velocidade constante e o veículo B pode ser controlado pelo guião apresentado na figura 141.

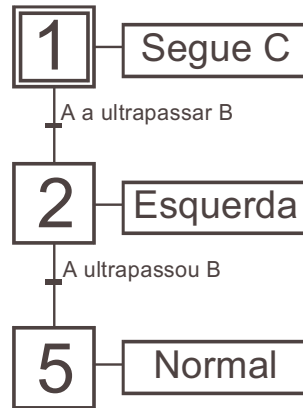


Figura 141. Guião para controlar a experiência da Ultrapassagem Concorrente

No início da experiência, apenas a etapa 1 está activa, permitindo que todos os veículos se movimentem autonomamente. Durante esta fase, é requerido ao veículo B que se mantenha na perseguição ao veículo C. Quando o veículo A se aproxima de B com o objectivo de o ultrapassar, a condição de transição torna-se verdadeira e a etapa 2 é activada. Aqui, é produzida uma ordem que provoca o início de uma manobra de ultrapassagem concorrente do veículo B ao veículo C. A condição de transição A a ultrapassar B pode ser implementada utilizando uma combinação lógica das funções sensoras disponibilizadas (ver tabela 9). Implementações possíveis para esta experiência são por exemplo:

- A a ultrapassar B = $\text{Dist}(A,B) < 2 \text{ m}$
- A a ultrapassar B = $\text{LDist}(A,B) > -2 \text{ m AND Speed}(A) > \text{Speed}(B)+10 \text{ m/s}$



Figura 142. Experiência de Ultrapassagem Concorrente numa estrada de três vias.

Uma versão mais complexa desta mesma experiência pode ser implementada utilizando a mesma especificação mas agora numa faixa de rodagem com três vias e com todos os veículos a deslocarem-se pela via central (figura 142). Neste caso, o veículo A pode decidir efectuar a ultrapassagem aos veículos da frente utilizando a via da esquerda ou utilizando a via da direita. Em qualquer dos casos, é fundamental para a concretização da experiência que o veículo B se desvie para o lado por onde vai ser ultrapassado.

Neste caso, o veículo B pode ser controlado pelo guião apresentado na figura 143. Quando a etapa 2 se encontra activa, o sistema aguarda até que uma das condições de transição se torne verdadeira. Se o veículo A decide ultrapassar B usando a via da esquerda, a condição $ODist(A,B) < -1m$ resulta verdadeira e será activada a etapa 3. Se o veículo A decide ultrapassar B usando a via da direita, a condição $ODist(A,B) > 1m$ torna-se verdadeira e será activada a etapa 4.

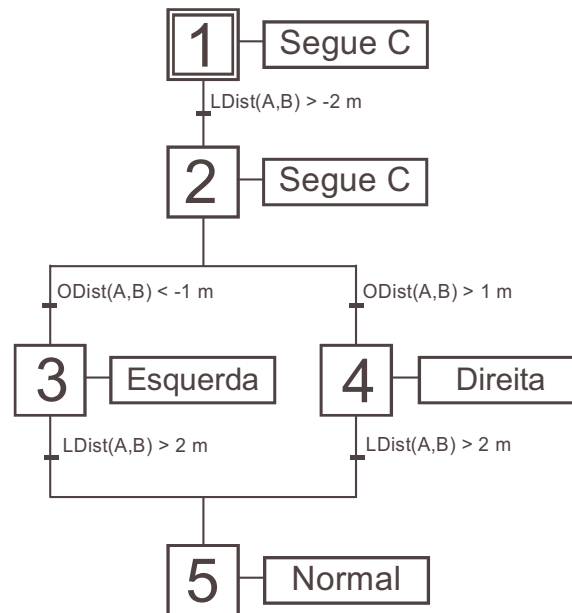


Figura 143. Guião para a experiência da Ultrapassagem Concorrente em 3 vias

Ambas as versões desta experiência foram implementadas no simulador de condução DriS, com o objectivo de demonstrar as funcionalidades oferecidas para a realização do controlo externo dos veículos autónomos.

5.4 Sumário

Neste capítulo apresentou-se o modelo comportamental utilizado para a implementação dos condutores virtuais dos veículos autónomos do simulador DriS. Este modelo comportamental foi desenvolvido numa estrutura em vários níveis, onde se integram abordagens de áreas diversas, como a inteligência artificial, a psicologia, e o controlo de sistemas. Esta concepção em vários níveis permitiu obter comportamentos realistas e permitiu ainda a aplicação de uma abordagem de implementação de controlo externo

utilizando um único modelo, ao contrário do que acontece na generalidade dos outros simuladores de condução com objectivos semelhantes. Desta forma, e sem necessidade de desenvolvimentos adicionais dedicados à implementação de controlabilidade, é possível comandar cada um dos veículos autónomos por ordens de níveis diversos. Uma vez que cada veículo autónomo mantém internamente toda a sua autonomia natural, ele pode receber ordens de níveis superiores, utilizando a sua autonomia para as tentar cumprir.

O nível tático foi concebido como uma hierarquia de módulos, cada um responsável apenas por uma entidade de tráfego relevante. Cada um dos módulos táticos gera uma saída que é uma função de domínio bidimensional contínuo. A opção por este espaço bidimensional contínuo em lugar do espaço discretizado utilizado noutras implementações, permite otimizar o módulo de activação final em termos de tempo de processamento e de resolução.

Foi também apresentada uma técnica inovadora de variação no nível de detalhe comportamental utilizado na simulação de elementos autónomos virtuais. A aplicação desta técnica à simulação dos veículos virtuais autónomos no simulador de condução DriS permite reduzir o peso computacional associado ao tratamento dos modelos computacionais sem prejudicar significativamente o realismo observável. Esta redução foi comprovada por uma experiência de avaliação que comparou o desempenho desta técnica com o obtido pela aplicação da vulgar técnica de eliminação da simulação dos objectos distantes. A análise do erro médio esperado nas condições da experiência, apresentada também na secção 5.2.2, permitiu demonstrar ainda uma redução significativa do erro tático observável.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

Nesta dissertação apresentou-se o trabalho realizado no âmbito do desenvolvimento de um simulador de condução realista, destinado à realização de experiências científicas de avaliação de traçados rodoviários e de comportamentos de condutores.

No capítulo 2 abordaram-se as tecnologias utilizadas para o desenvolvimento de simuladores de condução. Estes sistemas, sobretudo os destinados à realização de estudos científicos, requerem um nível de realismo elevado, grande flexibilidade de configuração do ambiente de condução e capacidade de produção de resultados rigorosos e validáveis. Para isso, a construção de um simulador exige a cooperação de diversos subsistemas, que devem ser desenvolvidos de forma coordenada por especialistas de áreas distintas. As arquitecturas utilizadas por alguns dos simuladores de condução mais avançados foram também apresentadas na secção 2.8.

Apesar dos subsistemas de síntese e apresentação de imagem e do posto de condução serem normalmente os componentes mais dispendiosos de um simulador de condução de base fixa, é ao nível da implementação e especificação de tráfego autónomo que se verificam actualmente as maiores necessidades de evolução. Por este motivo, as abordagens de implementação do tráfego autónomo em simuladores de condução foram apresentadas, de forma independente, no capítulo 3.

Nesse capítulo, depois de uma breve abordagem à forma como os condutores humanos resolvem a tarefa de condução dos veículos automóveis reais, descreveram-se as tecnologias utilizadas na implementação de controladores artificiais de veículos automóveis reais e as metodologias disponíveis para a implementação de agentes realistas em ambientes virtuais.

Algumas destas técnicas foram utilizadas na implementação do tráfego autónomo no simulador de condução DriS, apresentado no capítulo 5. O nível de modelação seleccionado (modelação comportamental) apresenta grandes vantagens sobre a modelação de níveis mais baixos, sobretudo em termos de realismo e de facilidade de especificação de ambientes. Estas vantagens são obtidas à custa de um aumento do custo computacional e também de um aumento das dificuldades associadas à capacidade de controlo externo. Nas aplicações que exigem um controlo preciso de alguns dos elementos autónomos, como é o caso dos simuladores de condução, a dificuldade de controlo dos modelos comportamentais é normalmente contornada pela introdução de novos agentes, simulados através de modelos não comportamentais. As soluções deste tipo obrigam, portanto, ao desenvolvimento de, pelo menos, dois modelos distintos.

O elevado peso computacional associado à simulação de um grande número de elementos autónomos exige a utilização de técnicas de optimização. A técnica de optimização mais utilizada consiste em efectuar a simulação apenas dos objectos que se encontram mais próximos do observador e algumas abordagens desta técnica foram apresentadas na secção 3.7. Nessa secção foram também analisadas as implicações da aplicação desta técnica sobre o realismo da simulação e as suas consequências nos diversos níveis de simulação. Conforme se demonstrou, a aplicação de técnicas de eliminação de simulação provoca incoerências, sobretudo a longo prazo, dificulta o processo de especificação de ambientes, obriga a desenvolvimentos adicionais destinados à geração de novos agentes, e a redução do peso computacional obtida é, por vezes, insuficiente.

Como também foi demonstrado, todos estes problemas se tornam mais significativos quando se utiliza simulação de nível elevado, como é o caso da simulação comportamental. Estas dificuldades serviram de motivação ao desenvolvimento de uma técnica inovadora de optimização do processo de simulação de um grande número de agentes, apresentada na secção 5.2.

No capítulo 4 descreveu-se a arquitectura utilizada na implementação do simulador realista de condução de veículos automóveis DriS. A arquitectura seleccionada permitiu uma implementação equilibrada de um sistema adequado à realização de experiências científicas de simulação de condução, como se constata pelas experiências de simulação já realizadas e bem sucedidas, que foram apresentadas na secção 4.2. Este simulador pode ser considerado funcionalmente equivalente aos melhores simuladores de condução científicos de base fixa existentes na Europa.

O simulador de condução DriS integra um posto de condução simplificado de um veículo automóvel com uma estação gráfica SGI *Onyx RealityEngine2*. Esta estação gráfica mantém a base de dados de objectos da cena e efectua as tarefas de simulação física e de

síntese de imagem. Comunica ainda com dois micro computadores, sendo um destinado à síntese de som e o outro à monitorização e controlo do posto de condução.

Para movimentar o veículo conduzido interactivamente, é realizada uma simulação dinâmica do movimento longitudinal do automóvel e uma simulação cinemática das mudanças de direcção. Este modelo do automóvel pode ser facilmente configurado através de aplicações gráficas interactivas que permitem especificar as principais variáveis físicas envolvidas.

Tendo em vista a simplificação dos processos de especificação e criação dos ambientes rodoviários destinados a simulações de condução, e o aumento de realismo, o simulador DriS foi apetrechado com veículos autónomos baseados em modelos comportamentais, cuja descrição foi apresentada no capítulo 5. Este modelo comportamental foi desenvolvido numa estrutura em vários níveis, onde se integram abordagens de áreas diversas, como a inteligência artificial, a psicologia, e o controlo de sistemas. Esta concepção em vários níveis permitiu obter comportamentos realistas e ainda aplicar uma abordagem de implementação de controlo externo utilizando um único modelo, ao contrário do que acontece na generalidade dos outros simuladores de condução com objectivos semelhantes. Desta forma, e sem necessidade de desenvolvimentos adicionais dedicados à implementação de controlabilidade, é possível comandar cada um dos veículos autónomos por ordens de níveis diversos. Uma vez que cada veículo autónomo mantém internamente toda a sua autonomia natural, ele pode receber ordens de níveis superiores, utilizando a sua autonomia para as tentar cumprir. A tarefa de preparação de uma experiência de simulação de condução fica assim mais facilitada, uma vez que a utilização de ordens de nível elevado permite a implementação de situações típicas com um menor número de ordens, e estas podem ser generalizadas a vários veículos. Esta facilidade não prejudica a controlabilidade do conjunto, uma vez que o preparador da experiência pode combinar especificar ordens de nível superior com ordens de baixo nível, impondo acontecimentos de forma muito precisa.

Para especificar estas ordens, o preparador de uma experiência de simulação pode elaborar um guião onde impõe o desencadeamento das acções externas de controlo. Este guião pode ser elaborado numa linguagem gráfica baseada em Graftet, com um editor próprio, ou em modo de texto, utilizando uma linguagem estruturada, desenvolvida especialmente para o efeito. Um módulo supervisor apresentado na secção 5.3 utiliza depois o guião e a informação recolhida do ambiente rodoviário a partir de sensores virtuais para controlar os veículos autónomos seleccionados.

Na secção 5.2 foi apresentado o trabalho de optimização realizado com o objectivo de conseguir uma simulação eficiente de um grande número de elementos autónomos, baseados em comportamento, em aplicações interactivas de tempo real. Este trabalho foi especialmente orientado para a optimização da simulação de veículos e outros agentes, no simulador de condução DriS. A técnica de optimização desenvolvida baseia-se no ajuste da precisão com que o modelo comportamental é resolvido, em função da distância para o ponto de observação, à semelhança do que acontece habitualmente com a selecção do nível de detalhe geométrico em sistemas de síntese de imagem. Ao contrário do que acontece

com outras técnicas de simplificação da simulação, a técnica proposta permite manter a simulação de todos os agentes envolvidos, conservando assim a coerência estratégica e evitando os problemas associados às técnicas de simplificação referidas.

Para avaliar o desempenho da técnica proposta de variação do nível de detalhe comportamental, foi realizada uma experiência que permitiu comparar a técnica proposta com a técnica habitual de eliminação da simulação dos objectos distantes. Esta experiência, descrita na secção 5.2.2, demonstrou que a aplicação da técnica proposta permite diminuir significativamente o processamento necessário para a simulação de um grande número de elementos virtuais autónomos, sem prejudicar o realismo perceptível, nem dificultar o trabalho de preparação de cenários.

6.1 Trabalho futuro

Apesar do estado actual de desenvolvimento do simulador DriS poder ser considerado funcional, um projecto deste tipo está, à partida, destinado a permanecer por muito tempo em fase de desenvolvimento. Da mesma forma que muitos dos requisitos actualmente cumpridos pelo simulador foram identificados apenas durante as primeiras utilizações efectivas, é provável que alguns dos requisitos necessários para a realização de experiências futuras ainda não tenham sido equacionados.

No âmbito da utilização do simulador, e para além da conclusão dos trabalhos já iniciados que foram referidos na secção 4.2, está ainda prevista a realização de novos estudos que envolvem experiências de condução simulada.

Um estudo de comportamento de condutores face à introdução de equipamento de auxílio à navegação, será iniciado dentro de pouco tempo. Este estudo, enquadrado num projecto Europeu recentemente aprovado, será realizado por um consórcio que inclui, para além da equipa do simulador DriS, a Universidade de Leeds e DGT Espanhola. Serão realizadas experiências paralelas em cada um dos pólos (Ibérico e Britânico), que incluirão condução simulada, nos simuladores DriS e LADS, e condução real, utilizando os veículos instrumentados da Universidade de Leeds e da DGT Espanhola.

Está neste momento em fase de elaboração uma proposta, a submeter à FCT, tendo em vista a realização de experiências de avaliação de sistemas de iluminação (pública e própria de veículos). Neste projecto será enquadrado o melhoramento do subsistema de síntese de imagem, com vista à obtenção, em tempo real, do realismo visual necessário.

Tendo em vista uma melhor rentabilização da infra-estrutura do simulador de condução DriS, existem diversas perspectivas de alargamento do âmbito da simulação para outros tipos de veículos. Uma das perspectivas mais promissoras destina-se ao treino de pilotos de navios. Nesse sentido, deverá ser desenvolvido um protótipo demonstrativo de simulador de navios que possibilite o estabelecimento das parcerias necessárias ao desenvolvimento de uma versão funcional.

Diversas outras aplicações do simulador nas áreas do comportamento do condutor e da segurança rodoviária deverão entrar proximamente em fase de programação.

Relativamente ao desenvolvimento do simulador, são muitos os melhoramentos previstos. De uma forma genérica, os melhoramentos mais especializados serão realizados no âmbito de projectos científicos de investigação nas áreas de simulação, computação gráfica e realidade virtual. Outros melhoramentos de implementação mais directa deverão ser enquadrados nos projectos de utilização do simulador, e desencadeados em função dos requisitos das experiências respectivas. Em qualquer dos casos e sempre que possível, serão integrados componentes resultantes de projectos curriculares, provenientes de qualquer das várias instituições associadas ao projecto do simulador de condução, rentabilizando assim o entusiasmo induzido pela participação num grande projecto como este.

Os melhoramentos do sub-sistema de síntese de imagem apresentados na secção 4.9.3, encontram-se neste momento em fase final de desenvolvimento. Deverão ser concluídos e integrados nos próximos tempos. Serão realizadas avaliações de desempenho das técnicas utilizadas e comparações com outras técnicas semelhantes conhecidas. Os resultados deverão ser incluídos num artigo a apresentar numa conferência científica da especialidade. Estão também equacionadas metodologias de geração rápida de sombras que possam ser aplicadas, em tempo real, aos objectos móveis mais significativos.

O modelo do veículo deverá também ser melhorado, efectuando-se uma simulação dinâmica completa, que incorpore o efeito dos elementos das suspensões e um modelo realista das forças resultantes dos contactos dos pneus no solo.

Em colaboração com outras instituições envolvidas no desenvolvimento de simuladores de condução científicos, nomeadamente a Universidade de Valência e a Universidade de Iowa, serão desenvolvidas novas ferramentas de modelação e especificação de ambientes rodoviários. Com esta colaboração, que poderá vir a ser formalizada num projecto internacional, pretende-se facilitar a partilha de situações de tráfego, de modo a permitir a comparação entre as simulações efectuadas em diversos simuladores de condução.

A adaptação de um novo posto de condução, que utilizará um corpo de um veículo automóvel real, é um dos melhoramentos mais urgentes e que tem estado suspenso face às limitações apresentadas pelo local de instalação. Este melhoramento deverá ser enquadrado no âmbito dos próximos projectos de utilização do simulador.

O alargamento do campo visual, utilizando mais conjuntos de projectores e ecrãs, é também um melhoramento que se encontra programado desde o início do desenvolvimento do simulador, mas ainda não concretizado devido, sobretudo, às limitações de espaço existentes.

A simulação de peões autónomos permitirá a realização de experiências de condução simulada em ambiente urbano. Estão neste momento já a decorrer dois projectos curriculares (um de Mestrado na F.E.U.P. e outro de Licenciatura, no I.S.E.P.) com objectivos de obtenção de infra-estruturas integráveis de animação de humanóides. A

autonomia e o controlo destes humanóides articulados serão atingidos com base num modelo comportamental derivado do apresentado no capítulo 5.

O fornecimento da sensação de aceleração pelo movimento do posto de condução é, dos melhoramentos previstos para o simulador de condução, um dos mais visíveis e entusiasmantes. A elevada complexidade do desenvolvimento e controlo de uma plataforma móvel deste tipo apresenta grandes desafios para as tecnologias de controlo de sistemas de tempo real actualmente disponíveis. O seu desenvolvimento justifica portanto um projecto autónomo de investigação para o qual deverá ser garantido apoio externo.

O condutor virtual, utilizado para dirigir os veículos autónomos, deverá também ser completado, nomeadamente através da integração do módulo de sinalização ainda não implementado e referido na secção 5.1.2.11. Independentemente deste melhoramento, está programado um trabalho de avaliação e eventual calibração de condutores virtuais. A avaliação será realizada a partir dos dados da condução de humanos no âmbito do estudo da influência de painéis publicitários, referido na secção 4.2.2. A metodologia a utilizar nesta avaliação não está ainda definida, mas será, provavelmente, baseada em comparações estatísticas de parâmetros como as posições dos veículos nas vias e as distâncias para os veículos da frente. A mesma metodologia poderá, mais tarde, ser aplicada também à avaliação da degradação de qualidade provocada pela aplicação da técnica de variação do nível de detalhe comportamental.

Em estudo estão também novas estratégias de variação do nível de detalhe comportamental que permitam um melhor equilíbrio entre a qualidade da simulação e o seu custo computacional. Uma estratégia promissora baseia-se na substituição da distância ao ponto de observação como parâmetro decisor na selecção do nível de detalhe comportamental, por outra variável decisora. Uma vez que, como foi demonstrado na secção 3.7, a observabilidade do erro comportamental é também influenciada pelo tempo de não observação, esperam-se resultados interessantes da utilização de variáveis decisoras que incluam, por exemplo, o integral temporal da distância ao ponto de observação.

Referências

- [Aasman88] J. AASMAN. *Implementations of Car-Driver Behaviour and Psychological Models*. J. A. Rothengatter e R. A. de Bruin (editores) *Road User Behavior: Theory and Practice*. Van Gorcum, Assen/Maastricht, pp. 106-118, Holanda, 1988.
- [Acevedo96] MARIO ACEVEDO, *Real-Time Multibody Formulation for Driving Simulators*, Symposium on the Design and Validation of Driving Simulators. Valencia, 1996
- [Ahmad94] OMAR AHMAD; JAMES. CREMER; JOSEPH. KEARNEY; PETER. WILLEMSSEN; STUART. HANSEN; *Hierarchical, Concurrent State Machines for Behavior Modeling and Scenario Control*; Proceedings of the 1994 Conference on AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems, pp. 36-42, Gainesville, December, 1994
- [Akeley93] KURT AKELEY, *RealityEngine Graphics*, Proceedings of the 20th annual conference on Computer Graphics, Siggraph'93, pp 109-116, 1993
- [Allen96] R. WADE ALLEN, STEVE ECKERT, RAY MAGDALENO, TOM SIEJA, COLLEEN SERAFIN, GRETCHEN ZOEBEL, *Manual Headway Control Experiments Conducted Under Test Track and Open Road Driving Conditions*, DOT/FHWA - DTNH22-270 16 Report, also as Ford Motor Company TR-2496 1, 1996
- [Alloyer97a] OLIVIER ALLOYER, ESMAIL BONAKDARIAN, JAMES CREMER, JOSEPH KEARNEY, PETER WILLEMSSEN, *Embedding Scenarios in Ambient Traffic*, Proceedings of the DSC'97 (Driving Simulation Conference) pp. 75-84, Lyon, France, Setembro de 1997
- [Alloyer97b] OLIVIER ALLOYER, SALVADOR BAYARRI, JAMES CREMER, JOSEPH KEARNEY, OLIVIER MUNIER, PETE WILLEMSSEN, *Hank: Virtual Driving Environments Unlocked*, <http://www.cs.uiowa.edu/~hank/hank-summary/hank-summary.html>, 1997

- [Balaguer95] JEAN-FRANCIS BALAGUER, ENRICO GOBBETTI, *Sketching 3D Animations*, Eurographics'95
- [Balci97] Osman Balci, *Guest Editorial: Simulation for Training: Foundations and Techniques*, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, Vol. 7, Nr. 3, July 1997
- [Baptista97] ANDRÉ MALAFAYA BAPTISTA. *Simulação Dinâmica de Veículos Automóveis*, Relatório do Projecto Final do Curso de Eng. Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997
- [Barrus95] JOHN BARRUS, GAVIN BELL, MARK WAKS, SARAH FERGUSON. *Summary of The Inventor Mentor*. Documento disponível na Internet, em: <http://www-europe.sgi.com/Technology/Inventor/VRML/TIMSummary.html>, 1995
- [Bates92] JOSEPH BATES, A. BRAYAN LOYALL, W. SCOTT REILLY, *An Architecture for Action, Emotion, and Social Behavior*, Proceedings of the Fourth European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, S. Martino al Cimino, Italy, Julho de 1992
- [Bayarri96] SALVADOR BAYARRI; MARCOS FERNÁNDEZ, *Design & Validation of Traffic Models in Driving Simulation*, Symposium on the Design and Validation of Driving Simulators, Valencia, 1996
- [Blackham99] GEOFF BLACKHAM. Visual Displays Systems for Car and Truck Simulators. Proceedings of the Driving Simulation Conference (DSC'99), Paris, France, July 1999
- [Blauert83] J. BLAUERT; *Spatial Hearing*; Massachusetts Institute of Technology Press, 1983.
- [Bloomfield98] JOHN R. BLOOMFIELD, SRINIVAS MADDHI, ANGELA R. GRANT A. TIMOTHY L. BROWN, LEE LEVITAN, J. MARTY CHRISTENSEN, TAMMIE L. CUMMING, *Using an Automated Speed, Steering, and Gap Control System and a Collision Warning System When Driving in Clear Visibility and in Fog*, Report FHWA-RD-98-050, 1998
- [Blumberg95] BRUCE M. BLUMBERG; TINSLEY A. GALYEAN; *Multi-Level Direction of Autonomous Creatures for Real-Time Virtual Environments*; Computer Graphics (Siggraph'95 Proceedings), 30(3), pp. 97-101, 1995
- [Borgan97] DAVID C. BROGAN, JESSICA K. HODGINS, *Group Behaviors for Systems with Significant Dynamics*, Autonomous Robots, 4, pp. 137-153, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- [Bruderlin89] ARMIN BRUDERLIN; THOMAS W. CALVERT; *Dynamic Animation of Human Walking*; Computer Graphics (Siggraph'89 Proceedings), 23(3), pp. 233-242, 1989
- [Bruderlin95] ARMIN BRUDERLIN; LANCE WILLIAMS; *Motion Signal Processing*; Computer Graphics (Siggraph'95 Proceedings), 30(3), pp. 97-101, 1995
- [Brumitt92] BARRY L. BRUMITT, R. CRAIG COULTER, ALONZO KELLY, ANTHONY STENTZ, *A System for Autonomous Cross-Country Navigation*, IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, May, 1992.
- [Carlson97] DEBORAH A. CARLSON, JESSICA K. HODGINS, *Simulation Levels of Detail for Real-time Animation*, Proceedings of the Graphics Interface Conference, 1997
- [Casey98] ROBERT F. CASEY, LAWRENCE N. LABELL, ELISABETH J. CARPENTER, JOSEPH A. LOVECCHIO, LEISA MONIZ, ROBERT S. OW, JACKSON W. ROYAL, JUDITH C. SCHWENK, CAROL L. SCHWEIGER, BUCK MARKS, *Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art Update '98*, Department of Traffic report DOT-VNTSC-FTA-97-9, 1998
- [Chenney97] STEPHEN CHENNEY, *Culling Dynamical Systems in Virtual Environments*, MSc Thesis, University of California at Berkeley, 1997

- [Chenney98] STEPHEN CHENNEY, JEFFREY ICHNOWSKI, DAVID FORSYTH, *Efficient Dynamics Modeling for VRML and Java*, 1998 Symposium on the Virtual Reality Modeling Language, Monterey, CA, February 1998
- [Choi98] K.K. CHOI, ROBERT L. SCHWING. Iowa Driving Simulator. Documento disponível na Internet, em <http://www.uiowa.edu/~vpr/research/units/driving.htm>, 1998
- [Chrislip95] CHRISTOPHER ALLEN CHRISLIP, JAMES FREDERICK EHLERT, Jr., *Level of Detail Models for Dismounted Infantry in NPSNET-IV.8.1*, MSc Thesis, Naval Postgraduate School, 1995
- [Coelho93] ANTÓNIO COELHO, PAULO CARIDADE, *Modelador para Simulador de Condução*, Relatório Final de Projecto de Seminário de Informática e Sistemas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1993
- [Coelho96] ANTÓNIO COELHO, *Integração de Som 3D em Simulação*, Tese de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996
- [Coelho98] ANTÓNIO COELHO, J. MIGUEL LEITÃO, F. NUNES FERREIRA. *Síntese de Som 3D em Ambientes de Realidade Virtual – Aplicação a Simuladores de Condução*. Actas do 8º Encontro Português de Computação Gráfica, Coimbra, 1998
- [Cohen-Or98] DANIEL COHEN-OR, G. FIBICH, D. HALPERIN, E. ZANDICARIO. *Conservative Visibility and Strong Occlusion for Viewspace Partitioning of Densely Occluded Scenes*. Proceedings of the Eurographics'98, Volume 17, Number 3, 1998
- [Cremer94] JAMES F. CREMER, GEORGE VANECEK, *Isaac: Building Simulations for Virtual Environments*, Proceedings of the IFIP TC 5 WG 5.10 International Workshop on Virtual Environments, Coimbra, Portugal, October 1994.
- [Cremer96] JAMES F. CREMER, JOSEPH K. KEARNEY, YANNIS PAPELIS, *Driving Simulation: Challenges for VR Technology*, IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 16-20, September 1996
- [Cremer97] JAMES F. CREMER; JOSEPH K. KEARNEY; PETER WILLEMSSEN; *Directable Behavior Models for Virtual Driving Scenarios*. Transactions of the Society for Computer Simulation, special issue on Multiagent Systems, 14(2), 1997.
- [Cunha98] VITOR CUNHA, NUNO AMADO, ANDRÉ MEDAS. *Toolkit para Realidade Virtual*, Relatório do Projecto Final do Curso de Eng. Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro de 1998
- [Daimler97] DAIMLER BENZ. *Driving Simulator*. Documento disponível na Internet em: <http://www.daimler-benz.com/presse/comp.htm>
- [DIS95] IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation (DIS) - Communication Service and Profiles, IEEE Standard P1278.1, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, 1995. Informação disponível em <http://www.sc.ist.ucf.edu/~STDS>, 1999
- [DRI98] DYNAMIC RESEARCH INC. *Capabilities and Facilities of Dynamic Research Inc.*, Documento disponível na Internet em: <http://www.dynres.com/intro.html>, 1998
- [Dunne00] PAUL DUNNE. *Using the m4 Macro Processor (m4 HowTo)*, LinuxWorld Web magazine, disponível em http://www.linuxworld.com/linuxworld/lw-2000-04/lw-04-m4_p.html, Abril de 2000
- [Fancher98] P. FANCHER, R. ERVIN, J. SAYER, M. HAGAN, S. BOGARD, Z. BAREKET, M. MEFFORD, J. HAUGEN, *Intelligent Cruise Control Field Operational Test*, Report No. DOT HS 808 849, also as UMTRI-98-17, 1998
- [Fernandez96] MARCOS FERNÁNDEZ, SALVADOR BAYARRI, ANDY LIU, *A Hidden Markov Model Based Approach to Autonomous Traffic Generation and Validation*, Abstract for

- the Workshop on Scenario and Traffic Generation for Driving Simulation, Orlando, 1996
- [Fernandez99] MARCOS FERNÁNDEZ, INMACULADA COMA, GREGORIO MARTÍN, SALVADOR BAYARRI. *A Hierarchical Object Oriented Architecture For the Management of Complex Driving Simulation Scenarios*, Proceedings of the Driving Simulation Conference (DSC'99), Paris, France, July 1999
- [Foley90] J. FOLEY, VAN DAM, FREINER, HUGHES, *Computer Graphics, Principles and Practice - 2nd Edition*, Addison-Wesley, 1990
- [Franklin96] STAN FRANKLIN; ART GRAESSER; *Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents*; Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages. Springer-Verlag, 1996.
- [Funge98] JOHN DAVID FUNGE, *Making Them Behave - Cognitive Models for Computer Animation*, Ph.D. Dissertation, University of Toronto, 1998
- [Funge99] JOHN DAVID FUNGE, *AI for Games and Animation: A Cognitive Modeling Approach*, <http://www.gamasutra.com/>, 1999
- [Funkhouser93] THOMAS A. FUNKHOUSER, CARLO H. SÉQUIN, *Adaptive Display Algorithm for Interactive Frame Rates During Visualization of Complex Virtual Environments*, ACM Computer Graphics (Siggraph'93 proceedings) pp. 247-254, 1993
- [Gallimore96] STEPHEN GALLIMORE, *Adding Behaviour to Graphical Elements in the Leeds Driving Simulator, an Object Based Approach*, Symposium on the Design and Validation of Driving Simulators, Valencia, Espanha, 1996
- [Gauriat97] P. GAURIAT, *Driving Simulators*, Documento disponível na Internet em http://www.inrets.fr/ur/sara/Pg_simus_e.html, 1997, atualizado em Abril de 2000
- [Girard85] M. GIRARD; A. MACIEJWSKI; *Computational Modeling for the Computer – Animation of Legged Figures*; Computer Graphics (Siggraph'85 Proceedings), 20(3), pp. 263-270, 1985
- [Gobbetti99] ENRICO GOBBETTI, ERIC BOUVIER. *Time-critical Multiresolution Scene Rendering*, IEEE Visualisation'99, pp. 123-130, 1999
- [Haefner98] LONNIE E. HAEFNER, MING-SHIUN LI, *Traffic Flow Simulation for an Urban Freeway Corridor*, Proceedings of the 1998 Transportation Conference, 1998
- [Hank99] THE HANK GROUP, UNIVERSITY OF IOWA, DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE. *Hank Driving Simulator Home Page*. Documento disponível na Internet em <http://www.cs.uiowa.edu/~hank>, 1999
- [Hartman91] J. HARTMAN, P. CREEK. *IRIS Performer Programming Guide*, Document Number 007-1680-020, Silicon Graphics Incorporated, Mountain View, CA, November 1991.
- [Hodgins95] J. HODGINS; W. WOOTEN; D. BROGAN; A. O'Brien, *Animating Human Athletics*; Computer Graphics (Siggraph'95 Proceedings), 30(3), pp. 71-78, 1995
- [Horst94] RICHARD VAN DER HORST, JEROEN HOGEMA, *Time-to-Collision and Collision Avoidance Systems*, Technical Report, TNO - Institute for Perception, Netherlands, 1994
- [Inguilizian95] ARAZ VARTAN INGUILIZIAN, *Synchronized Structured Sound: Real-Time 3-Dimensional Audio Rendering*; Tese de Mestrado, MIT, 1995 http://araz.www.media.mit.edu/people/araz/ss/Sound_Location.htm.
- [James84] LEON JAMES, *Data on the Private World of the Driver in Traffic: Affective, Cognitive, and Sensorimotor*, Artigo disponível pela Internet, em <http://www.soc.hawaii.edu/leonj/leonj/leonpsy/instructor/driving1.html>, 1984

- [Janssen93] WIEL JANSSEN, KAREL BROOKHUIS, MARJA KUIKEN, *Simulator and Field Evaluation of In-Vehicle Collision Avoidance Systems*, Report of First Year of Research for Nissan, 1993
- [Kearney99] JOSEPH KEARNEY, PETER WILLEMSSEN, STÉPHANE DINIKIAN, FRÉDÉRIC DEVILLERS, *Scenario Languages for Driving Simulation*, Proceedings of the DSC'99 (Driving Simulation Conference), pp.377-393, Paris, Julho, 1999.
- [Kelly94] ALONZO KELLY, *Essential Kinematics for Autonomous Vehicles*, Technical Report CMU-RI-TR-94-14, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1994
- [Koller94] DIETER KOLLER; TUAN LUONG; JITENDRA MALIK; *Binocular Stereopsis and Lane Marker Flow for Vehicle Navigation: Lateral and Longitudinal Control*; Report No. UCB/CSD 94-804, University of California, CS Division, Berkeley, 1994
- [Kreyszig88] ERWIN KREYSZIG. *Advanced Engineering Mathematics, sixth edition*. John Wiley & Sons, New York, 1988
- [Krus99] MIKE KRUS, PATRICK BOURDOT, FRANÇOISE GUISNEL, GUILLAUME THIBAUT, *Levels of Detail & Polygonal Simplification*, ACM Crossroads, disponível em: www.acm.org/crossroads/xrds3-4/levdet.html, 1999
- [Kuhl95] J. G. KUHLM, D. EVANS, Y. PAPELIS, R. ROMANO, G. WATSON, *The Iowa Driving Simulator: An Immersive Research Environment*, IEEE Computer Magazine, July 1995.
- [Kumar96] SUBODH KUMAR, DINESH MANOCHA, WILLIAM GARRETT, MING LIN. *Hierarchical Back-Face Computation*, Proceedings of the 7th Eurographics Workshop on Rendering, Porto, June 1996
- [LADS00] UNIVERSITY OF LEEDS. *Leeds Advanced Driving Simulator - Technical Overview*. Documento disponível na Internet em <http://mistrall.leeds.ac.uk/technical.html>, Junho de 2000
- [LaMothe95] ANDRE LAMOTHE. *Building Brains into Your Games*. Published in Game Developer Magazine, August, 1995
- [Leal96] JOÃO FILIPE LEAL, ARTUR ROCHA. *Sistema de monitorização e controlo de Cockpit*. Relatório do Projecto Final do Curso de Eng. Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996
- [Leitão94] J. MIGUEL LEITÃO. *Síntese por Computador de Imagens Estereoscópicas de Elevado Realismo*, Tese de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Abril de 1994.
- [Leitão97] J. MIGUEL LEITÃO, A. COELHO, F. N. FERREIRA. *DriS – A Virtual Driving Simulator*; Proceedings of the Second International Seminar on Human Factors in Road Traffic, ISBN 972-8098-25-1, Braga, 1997
- [Leitão98] J. MIGUEL LEITÃO, F. NUNES FERREIRA. *Agentes Autónomos em Ambientes Artificiais*, Actas do 8º Encontro Português de Computação Gráfica, Coimbra, 1998
- [Leitão99a] J. MIGUEL LEITÃO, A. AUGUSTO SOUSA, F. NUNES FERREIRA. *An Image Generation Sub-System for a Realistic Driving Simulator*, Proceedings of the International Conference on Imaging Science, Systems and Technology, Las Vegas, Nv USA, ISBN 1-892512-19-X, CSREA Press, 1999
- [Leitão99b] J. MIGUEL LEITÃO; A. AUGUSTO SOUSA; F. NUNES FERREIRA; *A Scripting Language for Multi-level Control of Autonomous Agents in a Driving Simulator*, Proceedings of the DSC'99 (Driving Simulation Conference), Paris, Julho de 1999
- [Leitão99c] J. MIGUEL LEITÃO, ALEXANDRA MOREIRA, JORGE A. SANTOS, A. AUGUSTO SOUSA, F. NUNES FERREIRA, *Evaluation of Driving Education Methods in a Driving Simulator*, Proceedings of the Eurographics Workshop on Computer

- Graphics and Visualization Education, pp. 159-164, Coimbra, Portugal, Julho de 1999
- [Leitão00a] J. MIGUEL LEITÃO, A. AUGUSTO SOUSA, F. NUNES FERREIRA. *Tactical Control of Autonomous, Virtual Vehicles*, Proceedings of the 19th IASTED International Conference Modelling, Identification and Control - (MIC 2000), Innsbruck Austria, February 2000, ISBN 0-88986-282-6, IASTED/ACTA Press, 2000
- [Leitão00b] J. MIGUEL LEITÃO, A. AUGUSTO SOUSA, F. NUNES FERREIRA. *Variação do Nível de Detalhe Comportamental de Agentes em Ambientes Simulados*, Revista VIRTUAL, Actas do 9º Encontro Português de Computação Gráfica, Marinha Grande, 2000
- [Leitão00c] J. MIGUEL LEITÃO, A. AUGUSTO SOUSA, F. NUNES FERREIRA. *Level-of-Detail Methods in Behavioral Simulations*. Submetido para publicação na Revista Simulation, Special Issue on Simulation and Visualization, Society for Computer Simulation International (SCS), 2000
- [Levine95] OREN H. LEVINE; RONALD R. MOURANT; *A Driving Simulator Based on Virtual Environments Technology*; Proceedings of the 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 1995
- [Lin95] GUEY-SHII LIN, PING LIANG, PAUL SCHONFELD, ROBERT LARSON, *Adaptive Control of Transit Operations*, Report No. MD-26-7002, DOT/FHWA, 1995
- [MacAdam89] CHARLES C. MACADAM, *Mathematical Modelling of Driver Steering Control at UMTRI, An Overview*, UMTRI Research Review, Vol 20 No 1, ISSN 0739 7100, 1989
- [MacAdam93] CHARLES C. MACADAM, P. A. GREEN, M. P. REED. *An Overview of Current UMTRI Driving Simulators*, UMTRI Research Review, July-August, 24(1), 1-8, 1993
- [Maes95] P. MAES; T. DARRELL; B. BLUMBERG; *The Alive System: Full Body Interaction with Autonomous Agents*; Proceedings of Computer Animation'95 Conference, Switzerland, April 1995, IEEE Press, pp. 11-18.
- [Marques99] BERTIL MARQUES, *Editor de Grafcet*, Relatório do projecto final do Curso de Estudos Superiores Especializado (CESE), Instituto Superior de Engenharia do Porto, 1999
- [Mason97] Ashton E. W. Mason, Edwin H. Blake, *Automatic Hierarchical Level of Detail Optimization in Computer Animation*, Proceedings of the Eurographics'97, Volume 16, Number 3, 1997
- [McGinnis96] MICHAEL L. MCGINNIS, GEORGE F. STONE III, *Measuring the Effectiveness of Simulation-Based Training*, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, pp 934-938, 1996
- [McKenna90] MYCHAEAL MCKENNA; DAVID ZELTZER; *Dynamic Simulation of Autonomous Legged Locomotion*. Computer Graphics (Siggraph'90 Proceedings), 24(4), pp. 29-38, 1990
- [McKnight70] J. MCKNIGHT, B. ADAMS. *Driver Education and Task analysis*, volume 1: *Task Descriptions*. Technical report, Department of Transportation, National Highway Safety Bureau, Novembro, 1970, referido em [James84], [Michon85], [Reece91] e [Sukthankar97].
- [McLendon92] PATRICIA MCLENDON. *Graphics Library Programming Guide*. Document Number 007-1210-060, Silicon Graphics, Inc. Mountain View, California, 1992, também disponível através da Internet em <http://techpubs.sgi.com/library/manuals/1000/007-1210-060/pdf/007-1210-060.pdf>

- [Michon85] J. A. MICHON, *A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do ?*, In L. Evans and R. Schwing (editors), Human Behavior and Traffic Safety, Plenum, 1985
- [Molen87] H. H. VAN DER MOLEN, A. M. T. BOTTICHER, *Risk Models for Traffic Participants: A Concerted Effort for Theoretical Operationalizations*, J. A. Rothengatter e R. A. de Bruin (editores) Road Users and Traffic Safety, Van Gorcun, Assen/Maastricht, pp. 61-82, Holanda, 1987
- [Montrym97] JOHN S. MONTRYM, DANIEL R. BAUM, DAVID L. DIGNAM, CHRISTOPHER J. MIGDAL. *InfiniteReality: A Real-Time Graphics System*. Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques, pp. 293–302, 1997
- [MultiGen98] MultiGen-Paradigm, Inc. *OpenFlight Specification v15.6.0*, Documento disponível na Internet, em http://www.multigen.com/products/pdf_files/of156.pdf, 1998
- [MultiGen99] MultiGen-Paradigm, Inc. *MultiGen Creator - Premier Tools for Realtime 3D Database Development*, Descrição disponível na Internet, em: http://www.multigen-paradigm.com/products/pdf_files/Creator_72dpi.pdf 1999
- [NADS00] National Advanced Driving Simulator - *General Information Page*. Descrição disponível na Internet, em <http://www.nads-sc.uiowa.edu>, 2000
- [Nechyba98] MICHAEL C. NECHYBA, *Learning and Validation of Human Control Strategies*, Ph.D. Dissertation, Carnegie Mellon University, CMU-RI-TR-98-06, 1998
- [NHTSA00] National Highway Traffic Safety Administration – *Home Page*. <http://www.nhtsa.dot.gov>, atualizada em 2000
- [Noriega97] PAULO NORIEGA; JORGE SANTOS; CARLOS RODRIGUES; PEDRO ALBUQUERQUE, *Vehicle's Motion Detection: Interaction with three Kinds of Road Pavement*, Proceedings of the Second International Seminar on Human Factors in Road Traffic, ISBN 972-8098-25-1, Braga, 1997
- [Ogata70] KATSUHIKO OGATA. *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ USA, 1970
- [Padmos92] PIETER PADMOS, MAARTEN V. MILDERS, *Quality Criteria for Simulator Images: A Literature Review*, Human Factors, 1992, 34(6), 727-748
- [Papelis96] YIANNIS PAPELIS, *Graphical Authoring of Complex Scenarios Using High Level Coordinators*, Abstract for the Workshop on Scenario and Traffic Generation for Driving Simulation, Orlando, 1996
- [Park89] D. PARK, *Doppler Effect*, Colliers Encyclopedia, pp. 350-351, 1989
- [Perlin94] KEN PERLIN; ATHOMAS GOLDBERG; *Improv: A System for Guiãoing Interactive Actors in Virtual Worlds*; Media Research Laboratory, Department of Computer Science, New York University
- [Pomerleau95] DEAN A. POMERLEAU, *Neural Network Vision for Robot Driving*, The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, M. Arbib, ed., 1995.
- [Pruckner97] ALFRED PRUCKNER, MICHAEL SEEMANN, *Analysis of Dynamic Driving Control Systems (DDC) on a Full Vehicle Model in ADAMS*, 12th ADAMS User Conference, Marburg, 1997
- [Reece91] DOUGLAS A. REECE, STEVEN SHAFER, *A Computational Model of Driving for Autonomous Vehicles*, Technical Report CMU-CS-91-122, Carnegie Mellon University, 1991
- [Reynolds87] CRAIG W. REYNOLDS, *Flocks, Heard and Schools: A Distributed Behavioral Model*, Computer Graphics (Siggraph 87 proceedings), 21(4), pp 25-34, July 1987
- [Rodrigues00] CARLOS RODRIGUES, J. MIGUEL LEITÃO, JORGE A. SANTOS, *Aplicações do Simulador de Condução no Âmbito da Segurança Rodoviária*. Para publicação nas

- Actas do 1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000, Lisboa, Novembro de 2000
- [Rogers88] STEVEN B. ROGERS, Walter W. Wierwille, *The Occurrence of Accelerator and Brake Pedal Actuation Errors during Simulated Driving*, Human Factors, 30(1), pp. 71-81, 1988
- [Rohlf96] J. ROHLF, J. HELMAN, *IRIS Performer: A High Performance Multiprocessing Toolkit for Real-Time 3D Graphics*; Computer Graphics (SIGGRAPH'96 Conference Proceedings), 1996.
- [Rosenblatt97] JULIO K. ROSENBLATT, *DAMN: A Distributed Architecture for Mobile Navigation*, Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, CMU-RI-TR-97-01, 1997
- [Rousseau98] DANIEL ROUSSEAU, BARBARA HAYES-ROTH, *A Social-Psychological Model for Synthetic Actors*, Proceedings of the Autonomous Agents 98 Conference, Minneapolis, 1998
- [Schumann92] J. SCHUMANN, J. GODTHELP, W. HOEKSTRA, *An Exploratory Simulation Study in the use of Active Control Devices in Car Driving*, TNO report IZF 1992 b-2, TD 92-0248, 1992
- [Seila95] ANDREW F. SEILA; *Introduction to Simulation*; Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, 1995
- [Serafin96] COLLEN SERAFIN, *Driver Preferences and Usability of Adjustable Distance Controls for an Adaptive Cruise Control (ACC) System*, DOT/HHWA - DTNH22-270 16 Report, 1996
- [Setas95] MIGUEL N. SETAS, MÁRIO RUI GOMES, J. M. REBORDÃO, *Dynamic Simulation of Natural Environments in Virtual Reality*, Proceedings of The First Workshop on Simulation and Interaction in Virtual Environments (SIVE95), Iowa City, IA, July 1995
- [Sillion97] FRANÇOIS SILLION; GEORGE DRETTAKIS, BENOIT BODELET, *Efficient Impostor Manipulation for Real-Time Visualization of Urban Scenery*, Proceedings of the Eurographics'97
- [Smith99] HARVEY SMITH, *Designing Enemies With Distinct Functions*, Gamasutra Magazine, Miller Freeman, Vol. 3: Issue 14 April 9, 1999
- [Stallman00] RICHARD M. STALLMAN. *The C Preprocessor for GCC version 2*. Documento disponível em http://www.gnu.org/software/gcc/onlinedocs/cpp_toc.html, actualizado em Julho de 2000
- [Steinmetz93] JOE STEINMETZ, G. LEE, *Auditory System*; EVE - The Encyclopedia of Virtual Environments, Documento disponível na Internet, em <http://www.hitl.washington.edu/scivw/EVE/III.A.2.Auditory.html>, 1993.
- [Sukthankar96] RAHUL SUKTHANKAR, JOHN HANCOCK, SHUMEET BALUJA, DEAN POMERLEAU, CHARLES THORPE, *Adaptive Intelligent Vehicle Modules for Tactical Driving*, Proceedings of AAAI '96, 1996
- [Sukthankar97] Rahul Sukthankar; *Situation Awareness for Tactical Driving*; Ph.D. Thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1997
- [Takala92] T. TAKALA, J. HAHN, *Sound Rendering*; Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings), pp. 211-220, 1992.
- [Terzopoulos99] DEMETRI TERZOPOULOS, *Artificial Life for Computer Graphics*, Communications of the ACM, Vol. 42, No 8, pp. 33-42, August 1999
- [TNO00] TNO - INSTITUTE FOR PERCEPTION. *The TNO Driving Simulator*. Descrição disponível na Internet, em <http://www.tm.tno.nl/facilities/text-driving.html>, 2000

- [Tu94] XIAOYUAN TU; DEMETRI TERZOPOULOS; *Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior*; Computer Graphics (Siggraph'94 Proceedings), pp. 43-50, 1994
- [Ünsal97] CEM ÜNSAL, *Intelligent Navigation of Autonomous Vehicles in an Automated Highway System: Learning Methods and Interacting Vehicles Approach*, Ph.D. Dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997
- [Ünsal98] CEM ÜNSAL, *Human Driver Models for AHS Simulations*, Technical Report CMU-RI-TR-98-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1998
- [Vandamme96] HÉLÈNE VANDAMME, WERNER SCHOENMAEKERS. *Simulcar - Modeling Tools for Dynamic Simulation of a Car*. Relatório do Projecto Final do Curso de Engenharia Informática, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 1996
- [Vince93] JOHN A. VINCE. *Real-Time Image Interaction in Flight Simulation*. Proceedings of the Virtual Reality - Toy and Tool Workshop, Bruxelas, Março de 1993
- [VRML97] *Virtual Reality Modeling Language*, International Specification ISO/IEC IS 14772-1, December 1997.
- [Wellman95] MICHAEL P. WELLMAN, STUART J. RUSSELL, *Decision-Theoretic Reasoning for Traffic Monitoring and Vehicle Control*, Idea Project Final Report, 1995
- [Wernecke94] JOSIE WERNECKE. *The Inventor Mentor - Programming Object-Oriented 3D Graphics with Open Inventor, Release 2*. Addison-Wesley Publishing Company ISBN 0-201-62495-8, 1994. Um resumo deste livro encontra-se disponível em [Barrus95].
- [Wildberg96] A. MARTIN WILDBERGER; *Introduction & Overview of "Artificial Live" – Evolving Intelligent Agents for Modeling & Simulation*; Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, 1996
- [Wilde94] GERALD J. S. WILDE, *Target Risk*, PDE Publications, 1994, também disponível em <http://psyc.queensu.ca/TargetRisk>, 1999
- [Wolffelaar98] PETER VAN WOLFFELAAR, *Functional Aspects of the Driving Simulator at the University of Groningen*, Artigo disponível na Internet em <http://www.ppsw.rug.nl/cov/simulator.pdf>
- [Wolffelaar99] PETER VAN WOLFFELAAR, SALVADOR BAYARRI, INMACULADA COMA, *Guião-based Definition of Complex Scenarios*, Proceedings of the DSC'99 (Driving Simulation Conference), pp.353-365, Paris, Julho, 1999.
- [Woo99] MASON WOO, JACKIE NEIDER, TOM DAVIS, DAVE SHREINER. *OpenGL Programming Guide, Third Edition*. Addison Wesley Longman Publishing Co; ISBN: 0201604582, 1999
- [Yanakiev95] DIANA YANAKIEV, IOANNIS KANELAKOPOULOS, *Engine and Transmission Modeling for Heavy-Duty Vehicles*, PATH Technical Note, MOU 124, Maio, 1995
- [Zyda94] MICHAEL J. ZYDA; D. R. PRATT; J. S. FALBY; C. LOMBARDO; K. KELLEHER; *The Software Required for the Computer Generation of Virtual Environments*; Presence, Vol. 2, No. 2, 1994

Anexo A

Matriz de Orientação

A orientação de um veículo ou de outro objecto, é especificada no simulador DriS pelos ângulos de Euler (θ, ψ, γ) , definidos como se segue.

O ângulo de azimute ou *heading* (θ) representa o ângulo de rotação em torno do eixo vertical (z) , conforme se esquematiza na figura **144**.

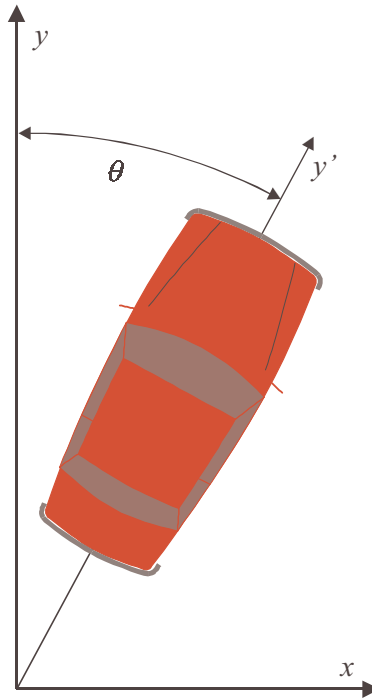


Figura 144. Definição do ângulo de azimute (θ).

Esta rotação corresponde à aplicação de uma transformação definida pela matriz $\mathbf{R}_\theta$, dada pela expressão (130).

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (130)$$

O ângulo de inclinação frontal ou *pitch* (γ) representa o ângulo de rotação em torno do eixo (x), conforme se esquematiza na figura 145

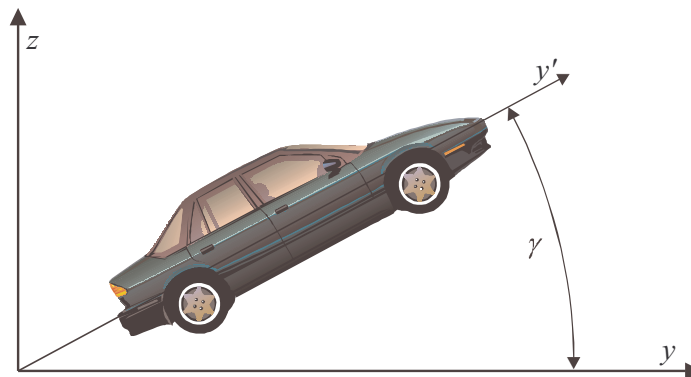


Figura 145. Definição do ângulo de inclinação frontal (γ).

Esta rotação corresponde à aplicação de uma transformação definida pela matriz $\mathbf{R}_\gamma$, dada pela expressão (131).

$$\mathbf{R}_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (131)$$

O ângulo de inclinação lateral ou *roll* (ψ) representa o ângulo de rotação em torno do eixo longitudinal (y), conforme se esquematiza na figura 146.

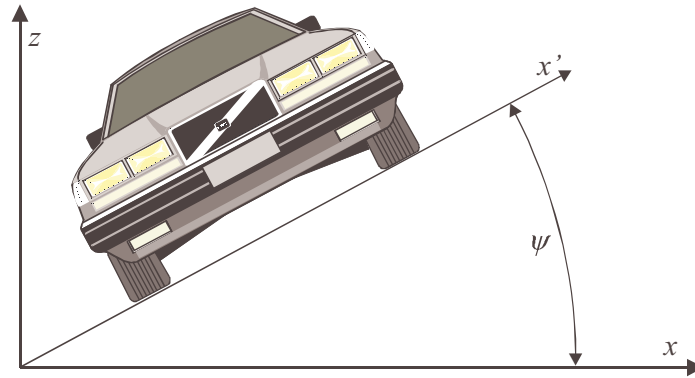


Figura 146. Definição do ângulo de inclinação lateral (ψ).

Esta rotação corresponde à aplicação de uma transformação definida pela matriz $\mathbf{R}_\psi$, dada pela expressão (132).

$$\mathbf{R}_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (132)$$

A orientação do veículo, ou outro objecto, pode então ser representada por uma matriz ($\mathbf{R}$), correspondente ao produto das matrizes de rotação apresentadas.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\psi \times \mathbf{R}_\gamma \times \mathbf{R}_\theta \quad (133)$$

Ou, utilizando as definições das matrizes de rotação das equações (130), (131) e (132):

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\psi \cdot c\theta - s\psi \cdot s\gamma \cdot s\theta & c\psi \cdot s\theta + s\psi \cdot s\gamma \cdot c\theta & -s\psi \cdot c\gamma \\ -c\gamma \cdot s\theta & c\gamma \cdot c\theta & s\gamma \\ s\psi \cdot c\theta + c\psi \cdot s\gamma \cdot s\theta & s\psi \cdot s\theta - c\psi \cdot s\gamma \cdot c\theta & c\psi \cdot c\gamma \end{bmatrix} \quad (134)$$

onde:

$$s\theta = \text{sen } \theta \quad c\theta = \cos \theta$$

$$s\psi = \text{sen } \psi \quad c\psi = \cos \psi$$

$$s\gamma = \text{sen } \gamma \quad c\gamma = \cos \gamma$$

A transformação de orientação de um ponto $\mathbf{P}$, pode ser definida como o produto da matriz de transformação $\mathbf{R}$ pelo ponto $\mathbf{P}$, de forma a obter um ponto transformado $\mathbf{P}'$, como se indica na expressão (135).

$$\mathbf{P}' = \mathbf{R} \times \mathbf{P} \quad (135)$$

Anexo B

Grafcet

O Grafcet é uma linguagem gráfica que permite descrever o funcionamento de um automatismo através de um conjunto de:

etapas, às quais estão associadas as **acções**

transições, às quais estão associadas as **condições de transição**

Este conjunto (gráfico ou diagrama) é chamado **Grafcet**.

Etapas e Acções

Uma etapa corresponde à situação em que o comportamento de todo um sistema ou parte dele permanece estável. Uma etapa representa-se por um quadrado ou um rectângulo, com um número de identificação no interior, conforme se apresenta na figura 147.

Uma etapa pode estar activa ou inactiva. Num determinado instante, o estado do automatismo é inteiramente definido pelo conjunto de etapas activas.

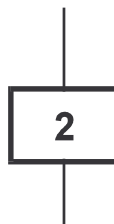


Figura 147. Representação de uma etapa em Grafcet

Para cada etapa têm de ser conhecidas as acções a efectuar. As acções estão em execução sempre que as respectivas etapas estejam activas e só quando elas estiverem activas. As acções a efectuar quando uma etapa está activa podem ser descritas em notação literal ou simbólica, no interior de rectângulos ligados ao lado direito da etapa, conforme se apresenta na figura 148.

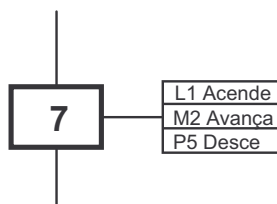


Figura 148. Etapa com acções associadas

As etapas inicialmente activas distinguem-se pelo rectângulo desenhado em traço duplo, conforme se apresenta na figura 149. Num diagrama Grafcet podem existir várias etapas inicialmente activas.

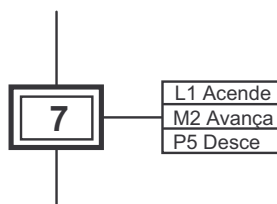


Figura 149. Etapa inicialmente activa

É também possível a utilização de macro etapas, podendo a sua descrição aparecer num diagrama separado. As macro etapas representam-se pelo rectângulo com traço vertical duplo, conforme se apresenta na figura 150.

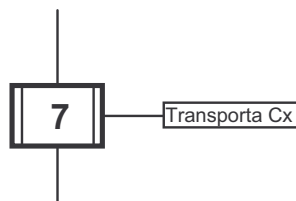


Figura 150. Macro etapa

Condições de Transição

Uma **transição** indica a possibilidade de evolução entre etapas. A cada transição associa-se uma condição lógica de transição. Esta condição, escrita sob a forma de uma proposição lógica, é uma função combinatória de informações lógicas (entradas, saídas, memórias, temporizadores, etc...) e determina o fim da etapa que a precede. Uma etapa permanece activa até que a condição de transição que lhe está associada seja verdadeira. As transições representam-se por um traço curto e grosso situado sobre cada uma das ligações entre etapas, conforme se apresenta na figura 151.

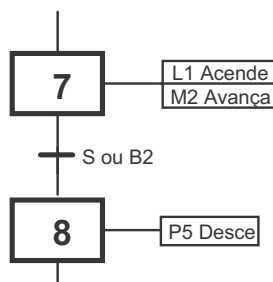


Figura 151. Transição entre etapas

Ligações

As ligações entre etapas são orientadas e irreversíveis. Sempre que possível as ligações entre etapas devem ser representadas por linhas verticais de cima para baixo.

As ligações entre etapas podem ser:

- Sequenciais
- Divergências em OU
- Convergências em OU
- Divergências em E
- Convergências em E

Numa ligação sequencial (figura 151), a transição diz-se validada quando a etapa precedente (etapa 7) está activa. Para que a transição seja efectuada é necessário que esta esteja validada e que, simultaneamente, a condição que lhe está associada ($S+B2$) seja verdadeira. Neste caso, a etapa 7 é desactivada e a etapa 8 é activada.

Divergência em OU

Uma divergência em **ou** representa-se por um traço de ligação horizontal onde chega uma ligação de entrada, e de onde partem duas ou mais ligações de saída conforme se apresenta na figura 152.

Numa ligação divergente em **ou**, a transição diz-se validada quando a etapa precedente (etapa 7) está activa. Para que a transição seja efectuada é necessário que esta esteja

validada, e que uma das condições (B1 ou B2) seja verdadeira. Neste caso, a etapa 7 é desactivada e é activada a etapa 8 **ou** (ou exclusivo) a etapa 9, dependendo da receptividade (B1 **ou** B2), que primeiro ficar verdadeira.

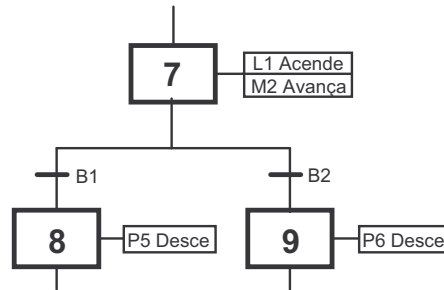


Figura 152. Divergência em **OU**

Convergência em **OU**

Uma convergência em **ou** representa-se por um traço horizontal de ligação onde chegam as ligações de entrada e de onde parte a ligação de saída, como se apresenta na figura 153.

Numa ligação convergente em **ou** a transição diz-se validada quando uma das etapas precedentes (etapas 8 **ou** 9) está activa. Para que a transição seja efectuada é necessário que esta esteja validada, e que a receptividade associada (B1 ou B2) seja verdadeira. Neste caso a etapa activa é desactivada, e é activada a etapa 10.

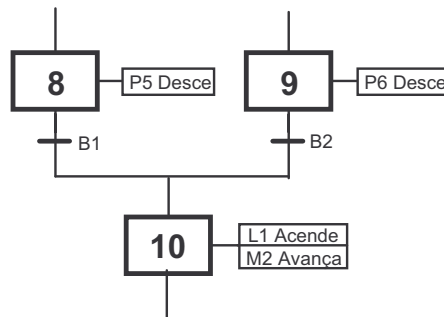


Figura 153. Convergência em **OU**

Divergência em **E**

Uma divergência em **e** representa-se por um traço horizontal duplo onde chega uma ligação de entrada e de onde partem duas ou mais ligações de saída, como se apresenta na figura 154.

Numa ligação divergente em **e** a transição diz-se validada quando a etapa precedente (etapa 7) está activa. Para que a transição seja efectuada é necessário que esta esteja validada e que a receptividade associada (B) seja verdadeira. Neste caso a etapa 7 é desactivada e são activadas simultaneamente as etapas 8 e 9.

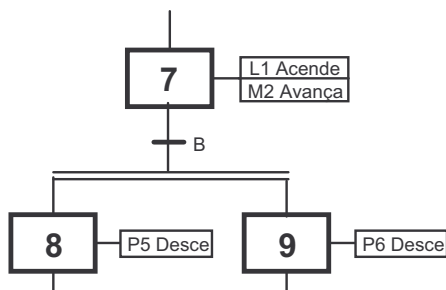


Figura 154. Divergência em E

Convergência em E

Uma convergência em **e** representa-se por um traço horizontal duplo onde chegam as ligações de entrada e de onde parte a ligação de saída, como se apresenta na figura 155.

Numa ligação convergente em **e** a transição diz-se validada quando todas as etapas precedentes (etapas 8 e 9) estão activas. Para que a transição seja efectuada é necessário que esta esteja validada e que a receptividade associada (B) seja verdadeira. Neste caso as etapas activas são desactivadas e é activada a etapa 10.

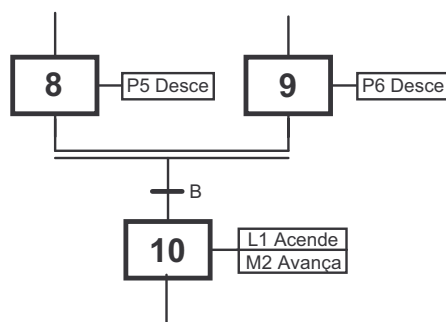


Figura 155. Convergência em E